



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

LABORATORNÍ ÚLOHA PRO OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ AUDIO ZAŘÍZENÍ

A LABORATORY TASK TO VERIFY THE PROPERTIES OF AUDIO DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karolína Staňková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Mikulka, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Studentka: Karolína Staňková

ID: 195771

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní úloha pro ověření vlastností audio zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Realizujte pracoviště laboratorní úlohy pro ověření vlastností mikrofonního zesilovače Behringer Ultragain ProMic 2200. Použijte měřicí techniku dostupnou v laboratoři BPC-MVAA a k vyhodnocení parametrů audio zařízení navrhnete podle norem AES17 a ČSN 60268-3 metodiku jednoduchých, resp. vícečetných měření automatizovaným systémem založeným na platformě HP VEE. Vytvořte návod pro studenty, vzorový protokol se skutečnými hodnotami ověřovaných parametrů a návod ke kontrolnímu měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] AES17-2015. AES standard method for digital audio engineering: Measurement of digital audio equipment. New York: Audio Engineering Society, 2015.

[2] ČSN 60268-3. Elektroakustická zařízení: Část 3: Zesilovače. Ed. 2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Mikulka, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této práce je seznámení s parametry audio zařízení a jejich měřením podle platných norem (AES17-2018 a ČSN EN 60268-3). Na základě studia těchto norem je pak vytvořena laboratorní úloha pro předmět Měření v audiotechnice. První část práce se věnuje podrobnému rozboru měření různých parametrů audio zařízení. Jsou zde popsány jednotlivé postupy, z nichž se v další části práce vychází při návrhu laboratorní úlohy. Druhá část práce je věnována sestavení této laboratorní úlohy. Pro realizaci vícečetného měření byl vytvořen automatizovaný systém na platformě HP VEE. Přílohy této práce obsahují návod k laboratorní úloze, vzorový protokol, návod ke kontrolnímu měření a vzor kontrolního měření.

Klíčová slova

laboratorní úloha, mikrofonní předzesilovač, audio zařízení, Měření v audiotechnice, přeslechy, dynamický rozsah, harmonické zkreslení

Abstract

The aim of this thesis is familiarization with the parameters of an audio device and their measurements according to the standards (AES17-2018 and ČSN EN 60268-3). A laboratory task for the Measurement in Audio Engineering course is designed, based on the study of the standards. The first part of the thesis deals with detailed analysis of the measurements of different parameters of audio device. The described procedures are consequently employed to design the laboratory task. The second part of this thesis is dedicated to design the laboratory task. The automatized system based on HP VEE platform was developed to provide the multiple measurement. The attachments of this thesis contain the student's manual for the laboratory task, the sample protocol, the testing measurement manual and the sample protocol for the testing measurement.

Keywords

laboratory task, microphone preamplifier, audio device, measurements in audio engineering, crosstalk, dynamic range, harmonic distortion

Bibliografická citace:

STAŇKOVÁ, Karolína. *Laboratorní úloha pro ověření vlastností audio zařízení*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118128> .
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Mikulka, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Laboratorní úloha pro ověření vlastností audio zařízení jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **24. 5. 2019**

.....
podpis autorky

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Mikulkovi, Ph.D. za trpělivost a cenné rady při tvorbě bakalářské práce. Také bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

V Brně dne: **24. 5. 2019**

.....
podpis autorky

Obsah

1.	Úvod	10
2.	Vlastnosti audio zařízení	11
2.1.	Lineární vlastnosti	11
2.2.	Nelineární vlastnosti	13
2.3.	Šum	20
2.4.	Interference a přeslechy	21
2.5.	Vlivy digitalizace	22
2.6.	Charakteristiky digitálního rozhraní	23
3.	Realizace laboratorní úlohy	25
3.1.	Zkoumané audio zařízení	25
3.2.	Laboratorní měřicí technika	26
3.3.	Vybraná měření pro laboratorní úlohu	27
3.4.	Struktura laboratorní úlohy	30
3.5.	Automatizované měření	35
4.	Závěr	40

Seznam obrázků

Obrázek 1: Nesymetrická nelinearita přístroje. [3]	14
Obrázek 2: Symetrická nelinearita přístroje. [3]	14
Obrázek 3: Měření rychlosti přeběhu	18
Obrázek 4: Zjednodušený blokový diagram analyzátoru DIM/TIM. [3]	19
Obrázek 5: Algoritmus měření nelinearity zisku.	20
Obrázek 6: Měřené zařízení	26
Obrázek 7: Přípravek na propojení měřeného přístroje s měřicími zařízeními	27
Obrázek 8: Schématické zobrazení zapojení přípravků pro měření	27
Obrázek 9: Náhradní zapojení zesilovače	31
Obrázek 10: Schéma zapojení pro automatizované měření kmitočtových charakteristik.....	31
Obrázek 11: Schéma zapojení pro měření harmonického zkreslení	32
Obrázek 12: Schéma zapojení pro měření mezikanálových přeslechů a dynamického rozsahu	33
Obrázek 13: Schéma programu pro automatizované měření kmitočtových charakteristik přístroje	38
Obrázek 14: Uživatelské rozhraní programu pro automatizované měření kmitočtových charakteristik.....	39
Obrázek 15: Pracoviště laboratorní úlohy	40

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty parametrů ověřovaných v laboratorní úloze, jak je uvádí výrobce v manuálu k přístroji [4].....	26
Tabulka 2: Tabulka pro doplnění změřených a vypočítaných hodnot – přeslechy, SNR , SR	34
Tabulka 3: Tabulka pro doplnění změřených a vypočítaných hodnot - THD	34

1. ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je příprava laboratorní úlohy do předmětu Měření v audiotechnice (BPC-MVAA) jejíž náplní bude ověření vlastností audio zařízení. Konkrétně se v této úloze budou měřit charakteristiky mikrofonního předzesilovače Behringer Ultragain Pro Mic2200. Cílem laboratorní úlohy je experimentální určení hodnot vybraných elektrických parametrů zesilovače s důrazem na vysokou didaktickou úroveň vedoucí k pochopení jednotlivých parametrů, jejich měření a správného vyhodnocení.

Při práci s jakoukoli audio technikou na profesionální úrovni je znalost významu různých vlastností audio zařízení nezbytná. Díky měření těchto charakteristik se studenti mohou naučit, jakým způsobem zařízení pracuje, na jakých principech, a dokáží pak lépe v praxi vyhodnotit použití jednotlivých přístrojů v různých situacích.

V teoretické části práce jsou nejprve rozebrány nejdůležitější parametry audio zařízení a možnosti měření těchto parametrů. Z tohoto rozboru se později vychází při přípravě konkrétních postupů, které jsou použity v laboratorní úloze. Normy [1][2], z nichž teoretická část práce čerpá, zmiňují takové množství jednotlivých možných měření, že jejich detailní výklad by výrazně přesáhl rozsah této práce. Proto nejsou v rozboru zmíněny všechny tyto charakteristiky, ale pouze takové, jejichž měření je možno provést v běžných podmínkách výukové laboratoře. Z těchto charakteristik jsou poté vybrána konkrétní měření, která se stanou součástí laboratorní úlohy.

Praktická část práce se zabývá samotnou laboratorní úlohou. První kapitola této části pojednává o měřeném zařízení a jeho parametrech uvedených v manuálu. Druhá kapitola popisuje použitou laboratorní techniku a naznačuje zapojení úlohy. Ve třetí kapitole jsou rozebrána jednotlivá měření tak, jak budou v úloze prováděna. Čtvrtá kapitola praktické části se pak zabývá sestavením laboratorní úlohy, popisuje její strukturu, naznačuje postupy měření a obsahuje též jednotlivá schémata zapojení. Poslední kapitola praktické části se věnuje rozboru programu pro automatizované měření kmitočtových charakteristik přístroje.

Hotový návod k měření laboratorní úlohy, vzorový protokol, návod ke kontrolnímu měření a vzor kontrolního měření pro vyučujícího jsou součástí příloh této práce.

2. VLASTNOSTI AUDIO ZAŘÍZENÍ

Použití jakýchkoli elektronických přístrojů v audio oblasti má jistá specifika, která jsou ovlivněna převážně kmitočtovým rozsahem lidského sluchu. Pro použití v audio oblasti je určující to, jaké má daný přístroj vlastnosti v audio pásmu, tedy na kmitočtech od 20 Hz do 20 kHz, a jak ovlivňuje výsledný slyšitelný signál.

Tato kapitola je věnována popisu jednotlivých vlastností, které má smysl u audio zařízení zkoumat, a metodám jejich měření. Tyto metody jsou pevně předepsány normami [1][2].

Vlastnosti audio zařízení je podle [1] možno rozdělit na:

- *lineární charakteristiky,*
- *nelineární charakteristiky,*
- *šum,*
- *interference a přeslechy,*
- *vlivy digitalizace,*
- *charakteristiky digitálního rozhraní,*
- *parametry vyžadující pokročilé měřicí vybavení.*

Tato práce se z výše uvedených důvodů věnuje hlavně prvním šesti zmíněným kategoriím vlastností audio zařízení.

2.1. Lineární vlastnosti

Mezi nejdůležitější lineární charakteristiky audio zařízení patří *maximální úroveň vstupního signálu a maximální úroveň výstupního signálu*. První hodnota určuje nejvyšší vstupní napětí, které může být na vstupu audio zařízení, aniž by došlo ke zkreslení výstupního signálu. Znalost této hodnoty je také důležitá proto, abychom přetížením audio zařízení nezničili. Druhá hodnota pak udává, jak velikého napětí můžeme dosáhnout na výstupu měřeného zařízení. Obě tyto hodnoty je možno změřit dvěma způsoby. Vždy zvolíme harmonický testovací signál o kmitočtu 997 Hz¹ [1].

¹ Kmitočet 997 Hz volíme proto, abychom při použití A/D převodníku plně využili všechny kvantizační úrovně. Pokud bychom zvolili kmitočet 1000 Hz, vzorkovací kmitočet by mohl snadno být celočíselným násobkem tohoto kmitočtu. Pak by se po určité době vždy opakovaly identické periody, které by obsahovaly ty stejné vzorky. Avšak při použití kmitočtu 997 Hz se těmto duplikacím vyhneme a lépe využijeme všechny dostupné kvantizační úrovně. Přestože toto opatření

Prvním způsobem určení pracovního rozsahu je analýza celkového zkreslení THD+N. Měříme míru zkreslení na výstupu měřeného zařízení a úroveň vstupního signálu zvyšujeme do takové hodnoty, při které THD+N dosáhne -40 dB.

Druhou metodou pro měření maximální úrovně vstupního či výstupního signálu je metoda komprese. Při použití této metody měříme úroveň napětí na výstupu. Postupně zvyšujeme amplitudu testovacího signálu na vstupu měřeného zařízení. Takto postupujeme, dokud není nárůst výstupního signálu o 0,3 dB nižší než nárůst testovacího signálu. Amplituda vstupního signálu v tomto momentě pak odpovídá maximální úrovni vstupního signálu a hodnota úrovně signálu na výstupu odpovídá maximální úrovni výstupního signálu.

Tyto hodnoty můžeme též měřit v závislosti na kmitočtu ve slyšitelném pásmu. Jednou z výše zmíněných metod změříme maximální úroveň vstupního i výstupního signálu na každém kmitočtu od 20 Hz do 20 kHz s krokem menším než jedna oktáva. Výsledky tohoto měření potom prezentujeme jako graf, na jehož horizontální ose je logaritmicky vynesena kmitočet, zatímco na vertikální ose je lineárně vynesena úroveň maximálního vstupního či výstupního signálu.

Velmi důležitou charakteristikou audio zařízení je taktéž jeho *kmitočtová charakteristika modulu a fáze přenosu*. Tato charakteristika popisuje závislost modulu a fáze přenosu zařízení na kmitočtu; určuje tedy kmitočtový rozsah přístroje. Podle norem [1] a [2] měříme kmitočtovou odezvu tak, že při kmitočtu, který určíme jako referenční (podle [1] 997 Hz), nejprve změříme vstupní a výstupní napětí U_{vst} a $U_{\text{výst}}$ na zkoumaném audio zařízení. Poté měníme kmitočet buď bod po bodu, nebo spojitě od 20 Hz do 20 kHz, tedy v celém slyšitelném pásmu, a na každém kmitočtu znovu změříme výstupní napětí $U'_{\text{výst}}$. Pomocí rovnice podle normy [2]

$$L = 20 \cdot \log \frac{U'_{\text{výst}}}{U_{\text{výst}}} \quad (1)$$

vypočítáme úroveň napětí v dB pro každý kmitočet. Norma [2] též zmiňuje možnost měření zařízení, v němž je použita výchozí ekvalizace². Použijeme výše uvedený postup, ale musíme znát přesnou charakteristiku této ekvalizace a při každém kmitočtu upravovat

dává smysl pouze při použití A/D a D/A převodníků, normy jej často volí jako referenční i u analogových zařízení [6].

² Filtrace signálu za účelem potlačení či zvýraznění některých kmitočtů.

vstupní napětí inverzně k dané ekvalizační křivce. Výsledné změřené a vypočítané úrovně napětí vyneseme do grafu, kdy tento modul přenosu je závislý na kmitočtu. Kmitočtová osa je v logaritmickém měřítku.

Kmitočtovou charakteristiku fáze přenosu měříme pomocí fázoměru. Stejně jako při měření modulu, i zde měníme kmitočet bod po bodu, či spojitě, a na každém kmitočtu zjistíme z měřicího přístroje fázi. Výsledné hodnoty fáze ve stupních prezentujeme jako graf závislosti fáze na kmitočtu, který opět zobrazíme logaritmicky. Fázovou charakteristiku lze podle normy [2] vyjádřit též jako časový rozdíl v mikrosekundách. Jeho výpočet můžeme provést pomocí rovnice

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{360 \cdot f} \cdot 10^6, \quad (2)$$

kde τ je hledaná hodnota časového rozdílu, $\Delta\varphi$ je rozdíl fází a f je kmitočet. Výsledné hodnoty vyneseme do grafu v závislosti na kmitočtu, zobrazeném logaritmicky.

Další důležitou charakteristikou, která ovlivňuje kvalitu přístroje, je jeho *zisk* (*gain*). Zisk se dá zjistit výpočtem poměru úrovně výstupního signálu ze zařízení k úrovni testovacího signálu, buď na referenčním kmitočtu 997 Hz, nebo v celém kmitočtovém rozsahu přístroje.

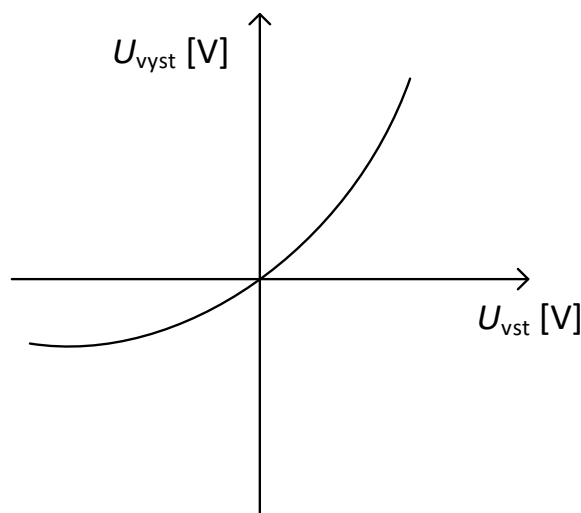
2.2. Nelineární vlastnosti

Nelineární charakteristiky zařízení se projevují tím, že ve spektru výstupního signálu měřeného zařízení nalezneme nejen základní složku vstupního harmonického signálu, ale též vyšší harmonické složky, jejichž amplitudová úroveň bývá cca o 90 - 100 dB nižší, než je úroveň základní harmonické složky [3]. Dochází tudíž ke zkreslení vstupního signálu. Setkáváme se s několika druhy tohoto jevu [1]:

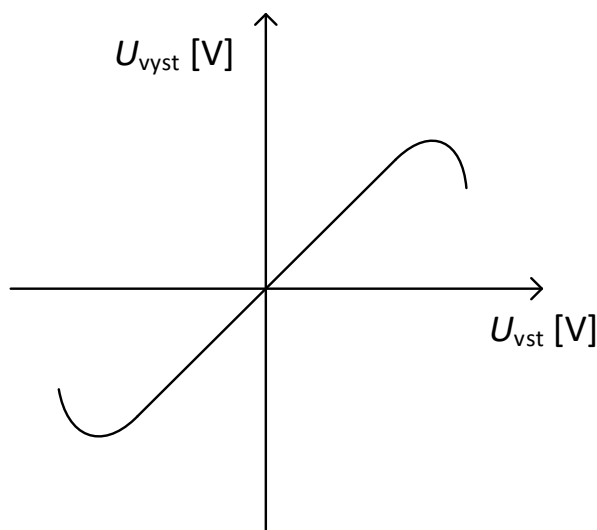
- *celkové harmonické zkreslení* (THD), případně *celkové harmonické zkreslení včetně šumu* (THD+N),
- *intermodulační zkreslení*,
- *dynamické/tranzientní zkreslení* (DIM/TIM zkreslení),
- zkreslení způsobené *nelinearitou zisku* (*gain*).

Celkové harmonické zkreslení včetně šumu (THD+N) je podle [3] nejčastější zkoumanou veličinou, kterou měří většina komerčních analyzátorů zkreslení. Nejlépe se tato vlastnost zařízení vyhodnocuje s použitím Fourierovy transformace výstupního

signálu. Tato matematická operace umožňuje určit kmitočtové spektrum měřeného signálu, a tudíž lze pozorovat všechny jeho harmonické složky a měřit jejich amplitudu. Podle typu nelinearity audio zařízení vznikají různé druhy zkreslení. Typ nelinearity lze určit z průběhu grafu závislosti výstupního napětí na vstupním. Pokud graf není symetrický podle nuly, jedná se o nesymetrickou linearitu (obr. 1), v opačném případě jde o linearitu symetrickou (obr. 2). Při nesymetrické nelinearitě přístroje dostáváme na výstupu převážně sudé harmonické složky, naopak symetrická nelinearita má za následek převahu lichých harmonických složek [3].



Obrázek 1: Nesymetrická nelinearita přístroje. [3]



Obrázek 2: Symetrická nelinearita přístroje. [3]

Při použití základního postupu měření THD+N budíme zkoumané audio zařízení harmonickým signálem. Měříme výstupní signál $U_{\text{výst}}$ nejprve bez použití filtru, a poté s použitím pásmové zádrže, která utlumí základní harmonickou složku testovacího signálu, takže na výstupu zůstanou pouze vyšší harmonické složky vygenerované nelinearitami přístroje. Toto výstupní napětí $U'_{\text{výst}}$ pak změříme a pomocí rovnice podle [2]

$$d_{\text{tot}} = \frac{U'_{\text{výst}}}{U_{\text{výst}}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

určíme celkové harmonické zkreslení d_{tot} , resp. THD+N v procentech.

Můžeme též měřit pouze celkové harmonické zkreslení THD bez šumu. Podle [3] se může THD uvádět s dodatkem, který popisuje nejvyšší harmonickou složku použitou ve výpočtu, například „THD do páté harmonické“. Pro výpočet činitele zkreslení tedy potřebujeme znát pouze amplitudy jednotlivých vyšších harmonických, které se objevily na výstupu měřeného audio zařízení. Činitel harmonického zkreslení K potom vypočítáme pomocí rovnice

$$K = \frac{\sqrt{U_{h2}^2 + U_{h3}^2 + \dots + U_{hn}^2}}{\sqrt{U_{h1}^2 + U_{h2}^2 + U_{h3}^2 + \dots + U_{hn}^2}} \cdot 100\% , \quad (4)$$

kde U_{h1} je napětí základní harmonické a U_{h2} až U_{hn} jsou napětí všech zjištěných či měřitelných vyšších harmonických složek signálu [5].

Harmonické zkreslení lze však měřit i jinými způsoby, jak zmiňuje norma [1]. Může nás například zajímat závislost zkreslení na kmitočtu či na amplitudě vstupního signálu. Použijeme základní postup měření THD+N tak, jak je uveden výše, s tím rozdílem, že kmitočet vstupního signálu měníme od 20 Hz do 20 kHz s krokem menším než jedna oktáva. Pak získáme různé hodnoty THD+N, které vyneseme do grafu v závislosti na logaritmicky zobrazeném kmitočtu. Taktéž můžeme při měření namísto kmitočtu upravovat vstupní napětí, a to od maximálního vstupního napětí přístroje, jehož měření je popsáno v kapitole 2.1, až do napětí s úrovní o 80 dB nižší, s krokem menším než 10 dB. Výsledné zkreslení pak vyneseme do grafu v závislosti na úrovni vstupního napětí, kde referenční úroveň je maximální vstupní napětí.

Další nelineární charakteristika, které se práce věnuje, je *intermodulační zkreslení*. Toto zkreslení může nastat tehdy, když budíme dané zařízení dvěma signály o různých kmitočtech. Na výstupu měřeného audio zařízení se pak objevují nejen vyšší harmonické

složky těchto dvou fundamentálních kmitočtů, ale též vyšší harmonické složky odpovídající součtu a rozdílu celočíselných násobků původních kmitočtů dle rovnice z [3]

$$f_k = m \cdot f_1 \mp n \cdot f_2, \quad (5)$$

kde f_k je k -tá harmonická složka výstupního signálu, m a n jsou celočíselné násobky a f_1 a f_2 kmitočty budicích signálů. Literatura [1][2][3] se shoduje na tom, že existují dva základní způsoby, jak intermodulační zkreslení měřit, přestože každý zdroj bere jako referenční či základní mírně odlišné hodnoty veličin:

1. První metodou je měření intermodulačního zkreslení při buzení tóny o dvou vzdálených kmitočtech. V doporučených hodnotách těchto základních kmitočtů se jednotlivé zdroje liší. Nejobecněji k nim přistupuje norma ČSN [2], která doporučuje zvolit nižší kmitočet f_1 v rozsahu 0,5-1,5 oktávy nad dolním mezním kmitočtem a vyšší kmitočet f_2 v rozsahu 0,5-1,5 oktávy pod horním mezním kmitočtem měřeného audio zařízení. Normy se shodují v doporučeném poměru špičkových úrovní budicích signálů, nejvhodnější poměr by měl být $f_1 : f_2 = 4 : 1$. Těmito signály budíme měřené audio zařízení, na jehož výstup připojíme pásmovou propust. Její středový kmitočet postupně nastavujeme na hodnoty jednotlivých vyšších harmonických složek, jejichž úroveň potřebujeme zjistit. Tyto harmonické složky jsou podle normy AES [1] na kmitočtech $f_2 - f_1$ a $f_2 + f_1$, tedy druhé kombinační harmonické složky; případně dle normy ČSN [2] můžeme měřit ještě třetí kombinační harmonické složky, tedy na kmitočtech $f_2 - 2f_1$ a $f_2 + 2f_1$. Na výstupu tohoto filtru pak měříme úroveň výstupního signálu. Výsledné modulační zkreslení druhé harmonické je potom poměr součtu úrovní výstupních signálů změřených za pásmovou propustí ku celkovému výstupnímu signálu podle rovnice dle [2]

$$d_{m2} = \frac{U_{výstf2-f1} + U_{výstf2+f1}}{U'_{výst}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

případně pro třetí harmonickou platí rovnice

$$d_{m3} = \frac{U_{výstf2-2f1} + U_{výstf2+2f1}}{U'_{výst}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

kde d_{mk} je procento zkreslení z celkové úrovně výstupního napětí pro k -tou harmonickou složku.

2. Druhá metoda je založena na měření intermodulačního zkreslení při buzení tóny o dvou blízkých kmitočtech. Tento postup probíhá podobně, pouze

se zvolí signály o jiných kmitočtech, jejichž doporučené hodnoty se opět mírně liší. Norma ČSN [2] (téměř ve shodě s Metzlerem [3]) předpokládá rozdíl kmitočtů maximálně 2 kHz, norma AES [1] je ještě přísnější, dle ní by měl být rozdíl kmitočtů budicích signálů maximálně 80 Hz. Oba signály každopádně mají mít stejnou amplitudu. Na výstup měřeného zařízení opět připojíme pásmovou propust, jejíž středové kmitočty budou tentokrát následující: pro měření zkreslení druhou harmonickou $f_1 - f_2$, pro měření zkreslení třetí harmonickou pak $2f_2 - f_1$ a $2f_1 - f_2$. Výsledné modulační zkreslení druhé harmonické je potom poměr úrovně výstupního signálu změřeného za pásmovou propustí ku referenčnímu výstupnímu signálu dle rovnice podle [2]

$$d_{m2} = \frac{U_{výstf_1-f_2}}{U_{výstref}} \cdot 100\% , \quad (8)$$

případně pro třetí harmonickou platí rovnice

$$d_{m2} = \frac{U_{výstf_1-f_2}}{U_{výstref}} \cdot 100\% , \quad (9)$$

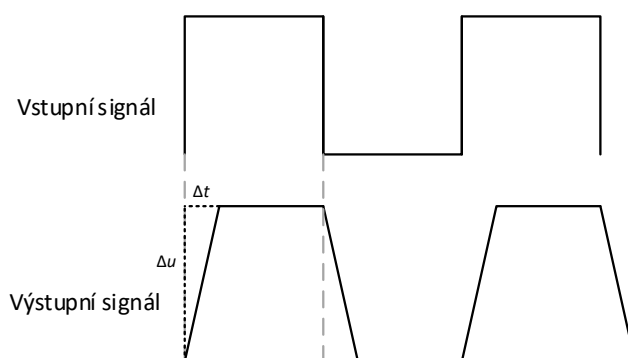
kde d_{dk} je procento zkreslení z celkové úrovně výstupního napětí pro k -tou harmonickou. Referenční napětí $U_{výstref}$ by se dle norem [1][2] mělo rovnat efektivní hodnotě z hodnoty špičkového napětí harmonického signálu na maximální úrovni vstupního signálu.

S intermodulačním zkreslením souvisí další nelineární charakteristika, a tou je *dynamické/tranzientní intermodulační zkreslení* (DIM/TIM). K němu dochází, je-li měřené audio zařízení buzeno signálem, jehož úroveň se výrazně a rychle mění v čase, například signálem obdélníkovým. Speciálně jsou na DIM/TIM zkreslení citlivé zesilovače se silnou zpětnou vazbou. Při tomto buzení potřebuje měřené zařízení určitý čas na opsání náběžné hrany, která se objevila v budicím signálu. Veličina popisující závislost změny napětí ve výstupním signálu ze zařízení na změně času se nazývá rychlost přeběhu (*slew rate*). Jednotkou rychlosti přeběhu je V/ μ s. Tato charakteristika je jednou z důležitých vlastností operačních zesilovačů, jejichž praktické užití je právě rychlostí přeběhu silně ovlivněno. Běžné operační zesilovače mohou mít rychlost přeběhu od 0,5 V/ μ s do 55 V/ μ s [8]. Minimální potřebná rychlost přeběhu je ovlivněna nejvyšším kmitočtem a maximálním rozsahem napětí zpracovávaného signálu. Self [8] uvádí jako příklad maximální rozsah napětí ± 17 V. Aby byl přístroj schopen stihnout vykreslit tento

rozsah i na nejvyšším slyšitelném kmitočtu, tedy na 20 kHz, musí použité operační zesilovače disponovat rychlostí přeběhu minimálně 2,1 V/μs. Rychlost přeběhu měříme tak, že zařízení budíme obdélníkovým signálem o kmitočtu 20 kHz o úrovni odpovídající maximální úrovni vstupního napětí přístroje. Na osciloskopu pak zobrazíme jak tento signál, tak i signál po průchodu měřeným zařízením (obr. 3), a měříme čas Δt a napětí Δu . Pomocí rovnice

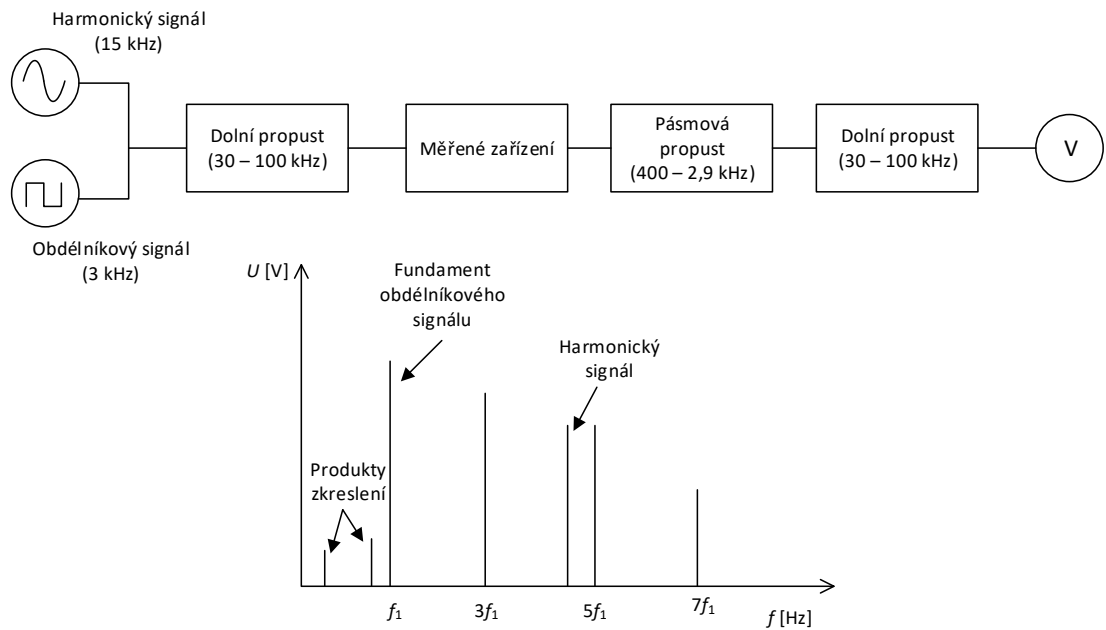
$$SR = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (10)$$

vypočítáme rychlost přeběhu. Tento výpočet je možno provést jak pro náběžnou, tak pro sestupnou hranu signálu.



Obrázek 3: Měření rychlosti přeběhu

Skutečnost, že se zařízení nedokáže okamžitě přizpůsobit změně na vstupním signálu, způsobuje zkreslení (obr. 4). Měření, jak jej uvádí Metzler [3], probíhá tak, že se audio zařízení budí signálem sestávajícím z pásmově omezené obdélníkové vlny (obvykle o kmitočtu 3 kHz) a harmonického signálu o vyšším kmitočtu (obvykle cca 15 kHz), jehož amplituda je oproti obdélníku čtvrtinová. Náběžné a sestupné hrany obdélníkového signálu jsou zátěží pro všechny obvodové prvky s omezeními na náběžné hraně, a tím pádem se na výstupu objevují různé harmonické složky základního kmitočtu obdélníku. Tyto složky jsou indikací zkreslení DIM/TIM. Pro řádné vyšetření kmitočtového spektra je nutno použít analyzátor s funkcí FFT.



Obrázek 4: Zjednodušený blokový diagram analyzátoru DIM/TIM. [3]

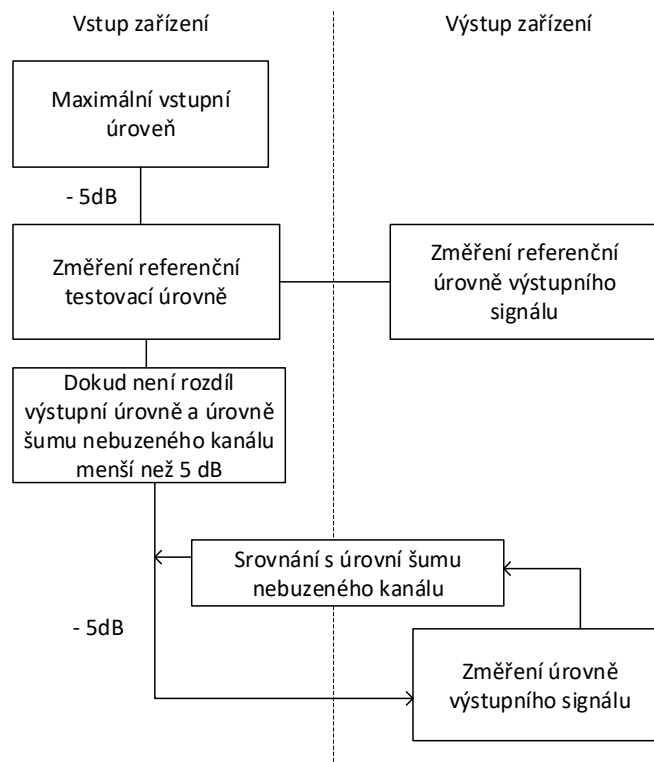
Mezi nelineární charakteristiky audio zařízení patří též *nelinearita zisku* (*gainu*). Při měření tohoto zkreslení zkoumáme, zda a jak se mění zisk zařízení v závislosti na vstupním signálu. Měřené audio zařízení budíme harmonickým signálem o kmitočtu 997 Hz, na výstup zařízení připojíme pásmovou propust se středovým kmitočtem 997 Hz. Pro toto měření je nutné znát úroveň šumu nebuzeného kanálu. Nejprve určíme referenční testovací úroveň L_{testref} vstupního signálu tak, že snížíme úroveň testovacího signálu o 5 dB oproti maximální úrovni vstupního signálu. Na výstupu pásmové propusti pak změříme efektivní hodnotu výstupního signálu, která bude pro nás referenční úrovní výstupního signálu $L_{\text{výstref}}$. Postupně snižujeme úroveň testovacího signálu po krocích menších nebo rovných 5 dB. V každém kroku změříme efektivní hodnotu na výstupu pásmové propusti, až dokud není úroveň vstupního signálu maximálně o 5 dB větší než úroveň šumu nebuzeného kanálu. Pro výpočet odchylky od ideální úrovně použijeme rovnici podle [1]

$$\sigma = L_{\text{výst}} - L_{\text{výstid}} , \quad (11)$$

kde σ je odchylka od ideální úrovně, $L_{\text{výst}}$ je výstupní úroveň a $L_{\text{výstid}}$ je ideální výstupní úroveň. Ideální výstupní úroveň je výstupní úrovní dokonale lineárního audio zařízení. Tu lze určit pomocí rovnice

$$L_{\text{výstid}} = L_{\text{výstref}} \cdot L_{\text{test}} - L_{\text{testref}} , \quad (12)$$

kde $L_{\text{výstřef}}$ je referenční úroveň výstupního signálu, L_{test} je testovací úroveň a $L_{\text{testřef}}$ je referenční testovací úroveň [1]. Výsledky vyjádříme graficky s úrovní testovacího signálu v dB na horizontální ose a odchylkou výstupní úrovně od ideální v dB na vertikální ose.



Obrázek 5: Algoritmus měření nelinearity zisku.

2.3. Šum

Ze šumových vlastností zařízení se budeme v této práci zabývat hlavně *dynamickým rozsahem zařízení*, jinak nazývaným poměr SNR (Signal to Noise Ratio; odstup signál-šum). Tato charakteristika popisuje poměr úrovně 0 dBFS³ na výstupu zařízení ku váhovanému šumu a úrovni zkreslení při buzení zařízení signálem s nízkou amplitudou. První možnost měření popisuje norma AES: Testovací signál je podle [1] harmonický o kmitočtu 997 Hz a jeho úroveň je o 60 dB nižší než maximální vstupní

³ decibel Full Scale, tedy úroveň relativní k plnému rozsahu zařízení. Plný rozsah odpovídá úrovni harmonického signálu, jehož špičková hodnota kladné půlvlny je rovna nejvyšší hodnotě kódu v digitální reprezentaci. Např. pro 24-bitový doplněk je tato hodnota 7FFFFFF_{16} . [1]

úroveň zkoumaného audio zařízení. Výstupní signál z něho filtrujeme dolní propustí⁴ podle normy [1] a pásmovou zádrží se středovým kmitočtem 997 Hz, na jejíž výstup připojíme ještě váhový filtr „CCIR-RMS“ podle normy ITU-R BS.468-4 s přidavným ziskem

-5,63 dB. Měříme výstupní signál z posledního filtru. Poměr maximální úrovně výstupního signálu ku změřené úrovni potom odpovídá dynamickému rozsahu měřeného zařízení.

Druhou možnost měření popisuje Metzler [3]. Zkoumané audio zařízení budíme signálem tak, aby se úroveň výstupního signálu blížila maximální výstupní úrovni signálu. Tuto naměřenou úroveň určíme jako referenční. Poté vstupní signál nahradíme spojem nakrátko a znovu změříme úroveň výstupního signálu. Výsledná změna této úrovně je hledaným poměrem SNR.

Při použití audio zařízení bychom též měli znát jeho *šum nebuzeného kanálu*. Tato charakteristika byla již zmíněna při popisu měření nelinearity zisku měřeného audio zařízení. Abychom zjistili tuto hodnotu, stačí změřit výstupní signál kanálu, jehož vstup je zkratován (u zařízení s analogovým vstupem) nebo jej budíme signálem o úrovni digitální nuly (u zařízení s digitálním vstupem). Šum nebuzeného kanálu je pak úroveň efektivní hodnoty signálu na výstupu měřeného audio zařízení.

2.4. Interference a přeslechy

Přeslechy (*crosstalk*) jsou takové signály, které se objevují na výstupu zařízení i přesto, že vstup tohoto zařízení není buzen.

Prvním zdrojem přeslechů v měřeném audio zařízení může být již samotné napájení. Tyto přeslechy změříme tak, že zkratujeme analogový vstup měřeného zařízení nebo budíme digitální vstup digitální nulou, a na výstup zařízení připojíme pásmovou propust. Její střední kmitočet zvolíme jako celočíselný M -násobek síťového kmitočtu. Postupně změříme výstup pásmové propusti pro hodnotu M od 1 do 5. *Přeslechy ze sítě* jsou potom rovny součtu změřených RMS úrovní výstupního signálu.

⁴ Norma AES definuje vlastnosti standardní dolní propusti takto: odchylka odezvy v propustném pásmu: $\leq \pm 0,1$ dB, $20 \text{ Hz} \leq f \leq f_{\text{mez}}$, kde f_{mez} je horní mezní kmitočet; útlum v nepropustném pásmu: ≥ 60 dB, $f > (f_{\text{vz}} - f_{\text{mez}})$, kde f_{vz} je vzorkovací kmitočet.

Při použití vícekanálových audio zařízení musíme počítat též s tzv. *mezikanálovými přeslechmi* či *přeslechmi mezi jednotlivými vstupními kanály stereo programu*. Budíme-li pouze jeden kanál, na výstupu druhého se objeví parazitní signál, přestože tento kanál buzen není. Pro změření mezikanálových přeslechů musíme budit pouze jeden kanál, a to harmonickým signálem s úrovní -20 dB oproti maximální vstupní úrovni [1]. Kmitočet tohoto signálu zvyšujeme od 20 Hz do horního mezního kmitočtu s krokem menším než 1 oktáva. Pro každý kmitočet vstupního signálu změříme úroveň signálu na výstupu obou kanálů, přičemž výsledný poměr mezikanálových přeslechů je poměr změřené hodnoty na nebuzeném kanálu ku úrovni výstupního signálu na buzeném kanálu. Výsledky prezentujeme v grafu, kde kmitočet na ose x je vyjádřen logaritmičticky a poměr mezikanálových přeslechů na ose y lineárně.

2.5. Vlivy digitalizace

Do této kategorie charakteristik řadíme charakteristiky spojené s A/D a D/A převodem, k němuž dnes dochází ve většině přístrojů. K vzorkování jsou nezbytné tzv. vzorkovací hodiny, jež určují, kdy přesně se má ze vstupního signálu vzorek odebrat. Tyto hodiny mohou být buď přímo v přístroji, nebo mohou být přivedeny na jeho referenční vstup, či případně mohou být zjištěny z jeho audio vstupu. Vzorkovací hodiny však mohou být do určité míry rozkolísané, tuto nestabilitu nazýváme *jitter*.

Důležitým přístroje využívajícího A/D převod je jeho schopnost utlumit signály nad $\frac{1}{2}$ vzorkovacího kmitočtu f_{vz} , tedy signály způsobující aliasing⁵. V podstatě se jedná o měření *kvality antialiasingového filtru*, tedy dolní propusti umístěné před samotným A/D převodníkem, která zabraňuje průchodu signálu o kmitočtu vyšším, než je $\frac{1}{2} f_{vz}$. Ověřujeme, zda tento filtr dokáže efektivně utlumit kmitočty, které by se mohly při vzorkování projevit jako rušivý aliasing. Schopnost filtru utlumit tyto kmitočty měříme pomocí harmonického signálu o kmitočtu 997 Hz, jehož úroveň je -20 dB oproti maximální vstupní úrovni. Poté změříme úroveň signálu na výstupu měřeného audio zařízení a zapíšeme si ji jako referenční hodnotu. Následně měníme postupně kmitočet od čtyřnásobku vnitřního vzorkovacího kmitočtu až po $\frac{1}{2}$ vnitřního vzorkovacího

⁵ přesný překlad je falšování. Jedná se o zkreslení vznikající při vzorkování signálu, které je způsobené nedodržením podmínky $f_{\max} \leq \frac{1}{2} f_{vz}$, kde f_{\max} je nejvyšší kmitočet vstupního signálu a f_{vz} je vzorkovací kmitočet.

kmitočtu, s krokem ne větším než 1/3 oktávy. V každém tomto kroku změříme úroveň výstupního signálu a vyjádříme ji jako poměr k referenční hodnotě. Zjištěné poměry vyneseme do grafu v závislosti na logaritmicky zobrazeném kmitočtu.

Analogicky lze měřit *kvalitu antiimagingového⁶ filtru*. Rozdíl je v tom, že kmitočet měníme v rozsahu od 20 Hz do horního mezního kmitočtu, a také v tom, že výstupní signál nejprve necháme projít pásmovou propustí se středovým kmitočtem nastaveným na kmitočet testovacího signálu a též standardní horní propustí⁷ podle [1].

2.6. Charakteristiky digitálního rozhraní

Co by nás jistě mělo zajímat v případě použití digitálního zařízení, je *délka vstupního slova*. Tuto charakteristiku můžeme měřit dvěma metodami:

1. První z nich je metoda dynamického rozsahu. Při jejím použití nejprve nastavíme délku slova na generátoru na 12 bitů a změříme dynamický rozsah zařízení podle postupu výše (v kapitole 2.3). Poté zvyšujeme postupně délku slova na generátoru o 1 bit a zapíšeme změnu dynamického rozsahu oproti předchozímu. Pokud je změna menší než 3 dB, jeden bit přidáme a výsledná délka slova je hledanou hodnotou délky vstupního slova měřeného zařízení.
2. Můžeme také použít metodu přepínání nejméně významného bitu (LSB). Zde je jako testovací signál použita sekvence vzorků se všemi bity nastavenými na nulu, kromě LSB, který nabývá hodnot 1, 1, 0, 0. Délka slova na generátoru je nejprve 12 bitů a změříme výstupní úroveň signálu filtrovaného pásmovou propustí se středním kmitočtem na 1/2 vzorkovacího kmitočtu. Poté zvyšujeme po jednom délku slova na generátoru a zapisujeme změnu úrovně filtrovaného výstupního signálu. Je-li tato změna menší než 3 dB, přidáme jeden bit a výsledná délka slova je délkou vstupního slova měřeného zařízení.

⁶ Imaging, obdoba aliasingu při D/A převodu. K imagingu dochází, pokud se do výsledného signálu dostanou kmitočty nesplňující podmínku $f_{\max} \leq \frac{1}{2} f_{vz}$, kde f_{\max} je nejvyšší kmitočet vstupního signálu a f_{vz} je vzorkovací kmitočet. Signály o těchto kmitočtech vznikají při vzorkování.

⁷ Norma AES definuje vlastnosti standardní horní propustí takto: odchylka odezvy v propustném pásmu: $\leq \pm 0,5$ dB, 1,3-krát $f_{mez} \leq f \leq 200$ kHz, kde f_{mez} je horní mezní kmitočet; útlum v nepropustném pásmu: ≥ 40 dB, 20 Hz $\leq f \leq f_{mez}$.

Taktéž pro nás může být důležitá *délka výstupního slova* zkoumaného audio zařízení. Její hodnotu by měl výrobce uvádět, nicméně dá se změřit tím, že zařízení budíme testovacím signálem s doporučeným kmitočtem 997 Hz a úrovní -60 dB až -20 dB relativně k maximální vstupní úrovni. Délka výstupního slova je množství bitů, jejichž hodnoty se v čase mění.

3. REALIZACE LABORATORNÍ ÚLOHY

Tato kapitola je zaměřená na vytvoření samotné laboratorní úlohy. Nejprve je pozornost věnována zkoumanému přístroji a jeho vlastnostem. Na základě poznatků o přístroji jsou následně vybrána vhodná měření tak, aby bylo v možnostech laboratorní měřicí techniky je smysluplně provést. Tato vybraná měření jsou posléze zařazena do struktury laboratorní úlohy, k níž je vytvořen návod k měření, vypracován protokol a připraven pracovní list pro kontrolní měření včetně vzoru pro vyučujícího.

3.1. Zkoumané audio zařízení

Než se začneme věnovat výběru konkrétních měřicích postupů, je nutno se nejprve zmínit o specifikacích přístroje, jehož charakteristiky máme za úkol v laboratorní úloze zkoumat. Na základě těchto informací a následujícího rozboru vlastností audio zařízení a jejich měření pak rozhodneme o tom, z jakých měření by se výsledná laboratorní úloha měla skládat.

Zkoumaným zařízením bude mikrofonní předzesilovač Behringer Ultragain Pro Mic2200 (Obrázek 6). Vlastnosti tohoto zařízení byly změřeny měřicím přístrojem Audio Precision APx525 (protokol z tohoto měření je součástí CD přílohy), což umožní srovnání výsledků laboratorní úlohy s takto zjištěnými kontrolními hodnotami. Výrobce v manuálu k přístroji [4] uvádí šířku přenosového pásma od 10 Hz do 200 kHz, maximální úroveň vstupního signálu +10 dBu pro mikrofonní vstup a +23 dBu pro linkový vstup (Tabulka 1). Vzhledem k tomu, že pro oba vstupy jsou měřicí postupy stejné, bude měření v laboratorní úloze probíhat pouze pro mikrofonní vstup. Hodnota +10 dBu odpovídá na základě vztahu

$$L = 20 \cdot \log \frac{U}{0,775} \quad (13)$$

maximálnímu napětí cca 2,45 V. Od tohoto napětí jsou v laboratorní úloze odvozena napětí testovacích signálů.



Obrázek 6: Měřené zařízení

Tabulka 1: Hodnoty parametrů ověřovaných v laboratorní úloze, jak je uvádí výrobce v manuálu k přístroji [4]

Parametr	Hodnota z manuálu	Hodnota změřená APx525
Maximální úroveň vstupního signálu – linkový vstup	+23 dBu	neměřeno
Maximální úroveň vstupního signálu – mikrofonní vstup	+10 dBu	neměřeno
Kmitočtový rozsah	10 Hz – 200 kHz, ± 3 dB	20 Hz – 20 kHz, ± 3 dB*
Mezikanálové přeslechy (z ch 1 do ch 2)	< -88 dB	-51,786 dB
Harmonické zkreslení THD	cca 0,011 %	0,121 %
Odstup signál-šum (SNR)	neuvádí	103 dB

*měřeno pouze na rozsahu slyšitelných kmitočtů

3.2. Laboratorní měřicí technika

Při měření laboratorní úlohy budou využity následující měřicí a laboratorní přístroje:

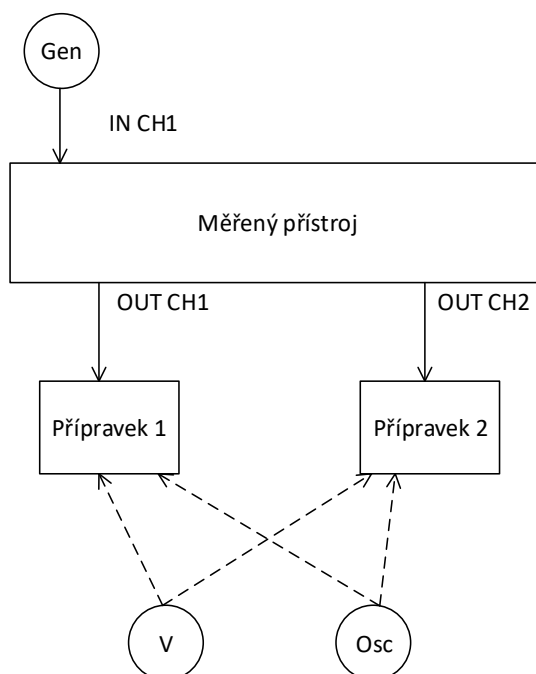
- osciloskop Agilent DSO-X-3012A
- voltmetr s možností měření TRMS
- dva přípravky na propojení měřeného přístroje s generátorem a osciloskopem

Pro předejití poškození měřeného i měřících zařízení byly pro laboratorní úlohu zhotoveny dva přípravky, které umožní připojování jednotlivých měřících přístrojů bez nutnosti přepojování vodičů mezi měřeným přístrojem a měřícími zařízeními. Tyto přípravky jsou při měření připojeny k výstupům obou kanálů předzesilovače. Pro

připojení měřeného přístroje k přípravku bude sloužit XLR konektor, pro připojení k osciloskopu a voltmetru pak dva BNC konektory (Obrázek 7).



Obrázek 7: Přípravek na propojení měřeného přístroje s měřicími zařízeními



Obrázek 8: Schématické zobrazení zapojení přípravků pro měření

3.3. Vybraná měření pro laboratorní úlohu

V laboratorní úloze se budou studenti zabývat měřením parametrů, které jsou určující pro většinu audio zařízení používaných v praxi pro zpracování zvukových signálů. U těchto přístrojů je kladen důraz hlavně na věrnost přenosu, a to v celém slyšitelném pásmu, dále také na co největší omezení nežádoucích jevů, jako jsou různé typy zkreslení

či mezikanálové přeslechy. Pro studenty audio inženýrství je tedy nezbytně nutné znát postupy měření těchto důležitých parametrů audio zařízení.

Jednou z takových charakteristik, kterou je v praxi nutno bezpodmínečně znát pro správné použití přístrojů a jejímuž měření se bude laboratorní úloha věnovat, je jejich *kmitočtová charakteristika modulu a fáze přenosu*. Tato vlastnost určuje vhodnost použití daného audio zařízení v různých situacích, jelikož například silně nelineární kmitočtová charakteristika může významně ovlivnit kvalitu výsledného zvuku. U mikrofonního předzesilovače je takovéto zkreslení nežádoucí, proto je ideální kmitočtová charakteristika modulu přenosu konstantní⁸ v celém slyšitelném pásmu, tj. minimálně na kmitočtech od 40 Hz do 16 kHz [5] (ideálně však od 20 Hz do 20 kHz). V laboratorní úloze použijeme postup měření, který byl popsán výše, tedy měření vstupního a výstupního napětí při různých kmitočtech od 20 Hz do 20 kHz. Výslednou kmitočtovou odezvu získáme tak, že vypočítáme úroveň výstupního napětí pro každý kmitočet pomocí rovnice (1) a závislost této hodnoty na logaritmicky zobrazeném kmitočtu vyneseme do grafu. Toto měření provedeme s pomocí počítačového software Keysight VEE, aby bylo možno změřit přenos na větším množství kmitočtů.

Nesporně důležitou součástí základních charakteristik předzesilovače, které určují jeho použití, kvalitu, a tedy i cenu, je jeho *harmonické zkreslení*. Měřením na přístroji Audio Precision byly zjištěny hodnoty harmonického zkreslení přístroje THD cca 0,121 % pro kanál 1. Pro měření harmonického zkreslení použijeme postup z kapitoly 2.2 a výpočet dle rovnice (4). Na osciloskopu si zobrazíme FFT analýzu výstupního signálu. Změříme amplitudy vyšších harmonických složek tohoto signálu a pomocí rovnice (4) vypočítáme činitel harmonického zkreslení K . Při měření přístrojem Audio Precision byly zjištěny amplitudy napětí do desáté harmonické složky. Nejnižší zjištěná hodnota byla 25 μV (na šesté harmonické). Během přípravy laboratorní úlohy bylo však zjištěno, že přesnost výsledků tohoto experimentu velmi závisí na nastavení amplitudy vstupního signálu a na nastavení osciloskopu. Některé vyšší harmonické, například výše zmíněná šestá, mají totiž hodnotu amplitudy hraničící s možnostmi rozlišení osciloskopu.

Při použití audio zařízení v praxi potřebujeme též znát jeho *odstup signál-šum (SNR)*, tedy poměr mezi šumem měřeného kanálu a maximální možnou úrovní signálu na tomto

⁸ Wirsum [5] uvádí, že v HiFi prostředí by odchylka v tomto pásmu neměla přesáhnout 1,5 dB.

kanálu. Znalost této hodnoty je důležitá u audio zařízení používaných pro nahrávání takových zdrojů signálu, které mají velký dynamický rozsah, tedy rozdíl mezi nejnížší a nejvyšší možnou úrovní signálu. Chceme-li takovýto zdroj věrně zachytit, je nutno použít zařízení s adekvátním poměrem signál-šum, jehož měření v laboratorní úloze proběhne. Použit bude postup z kapitoly 2.3, konkrétně druhá metoda. Nejprve studenti změří úroveň signálu na výstupu daného kanálu 1, která by se měla co nejvíce blížit maximální výstupní úrovni tohoto kanálu. Tato změřená hodnota bude brána jako referenční. Rozdíl této hodnoty a úrovně signálu na výstupu kanálu, jehož vstup je spojen nakrátko, je potom hledanou hodnotou odstupů signálu od šumu.

Při praktickém použití audio zařízení dochází často k buzení těchto přístrojů signálem, jehož průběh je výrazně proměnlivý v čase, dochází k rychlým změnám s velkým rozdílem napětí. Tyto změny mohou být nedostatečně věrně přeneseny, pokud použití zesilovač nemá dostatečnou *rychlost přeběhu*. Metodu měření rychlosti přeběhu popisuje kapitola 2.2.

Poslední důležitou vlastností, kterou budeme v laboratorní úloze zkoumat, jsou *mezikanálové přeslechy*. Podle manuálu přístroje by hodnota těchto přeslechů měla být menší než -88 dB od 22 Hz do 22 kHz. Měření provedeme tak, že budeme budit signálem kanál 1. Změříme výstupní úroveň signálu na výstupu obou kanálů. Poměr signálu na nebuděném kanálu 2 ku signálu na kanálu 1 je poměrem mezikanálových přeslechů, jak ukazuje rovnice

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{výst}2}}{U_{\text{výst}1}} \quad (14)$$

3.4. Struktura laboratorní úlohy

V této kapitole je popsána kompletní laboratorní úloha. Nejprve je naznačena struktura úlohy a posléze jsou jednotlivé body rozebrány tak, jak budou uvedeny v návodu k měření. Návod k laboratorní úloze je druhou přílohou této práce.

- Cíle
- Úkol
- Teoretický rozbor
- Experimentální část
 - a) Změřte kmitočtovou charakteristiku přenosu zesilovače.
 - b) Změřte rychlost přeběhu přístroje.
 - c) Zjistěte harmonické zkreslení THD přístroje.
 - d) Určete úroveň přeslechů z kanálu 1 do kanálu 2.
 - e) Změřte poměr signál-šum (SNR) přístroje.
- Zpracování naměřených hodnot
- Závěr
- Kontrolní otázky

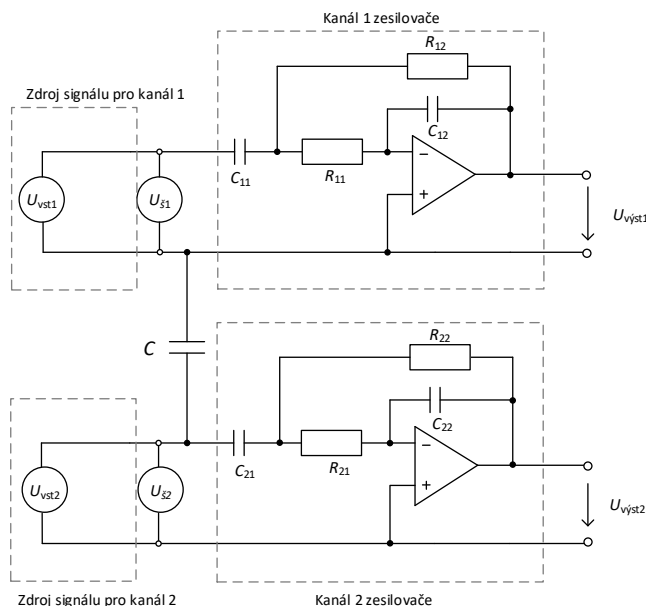
Cíle laboratorní úlohy jsou:

- Seznámit se s měřením kmitočtových charakteristik audio zesilovače s využitím automatizace.
- Naučit se změřit důležité parametry audio zařízení, např. mezikanálové přeslechy, rychlost přeběhu zesilovače, jeho dynamický rozsah a harmonické zkreslení.

Z těchto cílů vychází jednotlivé úkoly pro laboratorní úlohu:

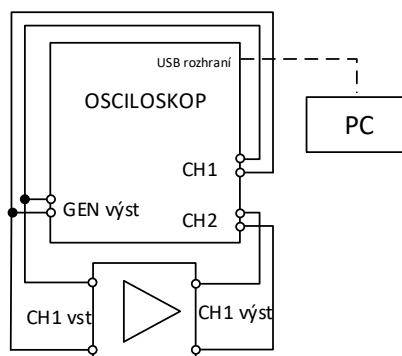
- Pomocí programu v prostředí Keysight VEE změřte kmitočtovou charakteristiku modulu a fáze přenosu zesilovače.
- Pomocí osciloskopu změřte spektrum výstupního signálu ze zesilovače buzeného harmonickým signálem a vypočítejte hodnotu činitele harmonického zkreslení.
- Změřte úroveň přeslechů v zesilovači z kanálu 1 do kanálu 2.
- Změřte a vypočítejte úroveň odstupu signálu od šumu.

Teoretický rozbor vychází z teoretické části této práce. Je v něm ve stručnosti popsáno použití audio zesilovačů v praxi a též jsou zde probrány jednotlivé měřené charakteristiky. Pro zjednodušení je zde uvedeno schéma náhradního zapojení zesilovače. V něm jsou jednotlivé kanály zobrazeny jako pásmové propusti, součástí schématu jsou i zdroje šumu a naznačení kapacitní vazby mezi kanály (Obrázek 9).



Obrázek 9: Náhradní zapojení zesilovače

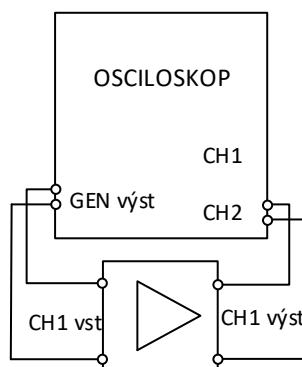
Experimentální část popisuje konkrétní postupy jednotlivých měření. Jako první bude v laboratorní úloze provedeno automatizované měření kmitočtových charakteristik přenosu zesilovače. Schéma zapojení tohoto měření je na obrázku (Obrázek 10). Studenti nejprve podle tohoto schématu zapojí všechny přístroje a poté spustí v PC program, který byl k tomuto účelu vytvořen. Jeho detailnímu rozboru se věnuje kapitola 3.5.



Obrázek 10: Schéma zapojení pro automatizované měření kmitočtových charakteristik

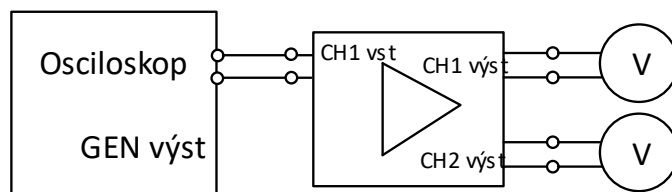
Dále se budou studenti v laboratorní úloze zabývat měřením rychlosti přeběhu zesilovače. Přístroje zůstanou pro tuto chvíli zapojeny téměř stejně, dle schématu na obrázku (Obrázek 10). Měřené zařízení bude buzeno obdélníkovým signálem se střídou 50%, napětím 2,45 V a kmitočtem 20 kHz. Pomocí osciloskopu budou odečteny rozdíly času a napětí, z nichž studenti vypočítají pomocí vzorce (10) rychlost přeběhu pro náběžnou i sestupnou hranu signálu.

Dalším úkolem v laboratorní úloze bude měření harmonického zkreslení přístroje. Zapojení je na obrázku (Obrázek 11). Přístroj bude buzen harmonickým signálem s amplitudou 2,18 V a kmitočtem 997 Hz. Bude provedena Fourierova analýza signálu pomocí osciloskopu, studenti budou zobrazovat a posléze tisknout grafické zobrazení FFT pro prvních deset harmonických složek. Zjistí jednotlivé úrovně těchto složek signálu a pomocí rovnice (4) vypočítají činitel harmonického zkreslení THD přístroje.



Obrázek 11: Schéma zapojení pro měření harmonického zkreslení

Předposlední částí laboratorní úlohy bude měření mezikanálových přeslechů. Schéma zapojení ukazuje obrázek (Obrázek 12). První kanál bude buzen harmonickým signálem s amplitudou 245 mV_{pp} o kmitočtech 997 Hz, 1 994 Hz, 4 985 Hz, 9 970 Hz, 14 955 Hz a 19 940 Hz, druhý kanál bude zapojen nakrátko pomocí zkratovacího terminálu. V tomto bodě je důležité shodné nastavení obou kanálů zesilovače, a to hlavně nastavení ovladače vstupního zisku. Výstupy obou kanálů budou měřeny přesným voltmetrem a výpočtem podle rovnice (14) bude zjištěna úroveň přeslechů z kanálu 1 do kanálu 2.



Obrázek 12: Schéma zapojení pro měření mezikanálových přeslechů a dynamického rozsahu

Poslední vlastnost přístroje, kterou budou studenti zjišťovat jeho dynamický rozsah. Zapojení zůstává stejné jako při předchozím měření, měří se pouze výstup buzeného kanálu 1. Jako buzení se použije harmonický signál o kmitočtu 997 Hz s amplitudou 2,45 V_{pp}. Nejprve bude změřeno výstupní napětí tohoto kanálu při buzení a poté bude jeho vstup odpojen od generátoru a zkratuje se pomocí zkratovacího terminálu, načež bude změřeno výstupní napětí nebuzeného kanálu.

Další částí laboratorní úlohy je zpracování naměřených hodnot. Automatizovaným měřením získají studenti grafy v MS Excel, v nichž musejí vyznačit přenosové pásmo zesilovače včetně mezních kmitočtů, na nichž dochází k poklesu zesílení o 3 dB. Dále vypočítají rychlost přeběhu pro náběžnou i sestupnou hranu signálu, činitel harmonického zkreslení, přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2 pro všechny měřené kmitočty a poměr signál/šum přístroje. Všechny změřené a vypočítané hodnoty uvedou do tabulek (Tabulka 2 a Tabulka 3):

Tabulka 2: Tabulka pro doplnění změřených a vypočítaných hodnot – přeslechy, SNR , SR

Přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2:			
f	$U_{výst1}$	$U_{výst2}$	L_p
Hz	V	mV	dB
997			
1 994			
4 985			
9 970			
14 955			
19 940			
Dynamický rozsah			
$U_{výstmax}$	$U_{výstmin}$	SNR	
V	mV	dB	
Rychlost přeběhu			
Hrana	Δu	Δt	SR
	V	μs	V/ μs
náběžná			
sestupná			

Tabulka 3: Tabulka pro doplnění změřených a vypočítaných hodnot - THD

n	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f	Hz	997	1 994	2 991	3 988	4 985	5 982	6 979	7 976	8 973	9 970
L_n	dBV										
U_n	V										

V závěru laboratorní úlohy bude úkolem studentů porovnat naměřené hodnoty s hodnotami, které jsou uvedeny výrobcem v manuálu k přístroji. Tyto hodnoty jsou v tabulce (Tabulka 1).

Poslední součástí laboratorní úlohy jsou kontrolní otázky pro studenty. Jejich účelem je ověření, zda studenti pochopili problematiku a zda vědí, co přesně budou měřit, a jak k daným jevům dochází.

3.5. Automatizované měření

Jedno z dílčích měření, které bude v rámci úlohy provedeno, proběhne automatizovaně pomocí programu v softwaru Keysight VEE. Tato kapitola se věnuje rozboru tohoto programu.

Keysight VEE je grafický programovací nástroj zajišťující dálkové ovládání měřicích a jiných přístrojů. Samotná stavba konkrétního programu probíhá pomocí objektů, které jsou řazeny a propojovány mezi sebou tak, aby plnily požadované funkce. Každý z objektů je pak možno převést do tzv. operačního rozhraní, tedy do okna, které se zobrazí konečnému uživateli.

Schéma programu použitého pro automatizované měření v laboratorní úloze je na obrázku (Obrázek 13). Při spuštění programu dojde k otevření souboru v MS Excel, *charakteristika.xlsx*, z nějž jsou čteny kmitočty, které se postupně nastavují na generátoru. Do tohoto souboru se pak též ukládají výsledky měření, tedy napětí na zesilovači U_z , napětí na generátoru U_g a rozdíl fází mezi těmito napětími. Po spuštění samotného procesu měření tlačítkem *Start* se nejprve v objektu s názvem *Pro nastaveni zesilovace* následovně nastaví osciloskop:

- přepnutí do výchozího nastavení příkazem „SYST:PRES“
- nastavení dělicího poměru kanálu 2 na 1:1 příkazem „CHAN2:PROB 1“
- generování harmonického signálu příkazem „WGEN:FUNC SIN“
- kmitočet generovaného signálu na 1 000 Hz příkazem „WGEN:FREQ 1000“
- amplituda generovaného signálu na 730 mVpp příkazem „WGEN:VOLT 0.730“
- zapnutí výstupu interního generátoru příkazem „WGEN:OUTP 1“
- rozlišení kanálu 1 osciloskopu na 230 mV příkazem „CHAN1:SCAL 230 mV“
- rozlišení kanálu 2 osciloskopu na 5 V příkazem „CHAN2:SCAL 2 V“
- časová základna na 5 ms příkazem „TIM:SCAL 0.0005“

Úvodní nastavení osciloskopu je důležité pro zajištění přesného měření, neboť je jím určeno správné rozlišení měřicího přístroje. Časová základna se pak upravuje v průběhu měření pro každý kmitočet. Tato i veškerá další nastavení osciloskopu probíhají pomocí jednoduchých příkazů, které se na osciloskop odesílají přes rozhraní USB.

Následně program požaduje po uživateli nastavení vstupního zisku zesilovače tak, aby indikátor ukazoval 0 dB. Toto nastavení je potřeba provést, aby během měření nedošlo ke zkreslení výstupního signálu vlivem limitace přístroje. Pokud by byl zisk přístroje nastaven na příliš vysokou hodnotu, docházelo by při měření k jeho přebuzení a tím by byly výsledné kmitočtové charakteristiky zkresleny. Po úpravě nastavení přístroje a stisknutí tlačítka *OK* v dialogovém okně začne probíhat samotné měření. Pokud uživatel vybere možnost *Cancel*, objeví se chybové hlášení a měření není provedeno.

Proces měření začíná nejprve cyklem, který určuje číslo řádku ve zdrojovém souboru, z něhož má program číst hodnotu kmitočtu, a do něhož má v posledním kroku měření zapsat zjištěné hodnoty veličin. Toto číslo přechází do dvou bloků *TO/FROM DDE*, které komunikují s externím souborem MS Excel. První provede čtení hodnoty kmitočtu ze souboru a tuto hodnotu odevzdá jako výsledek dvěma dalším objektům, druhý provede posléze zápis změřených hodnot do souboru. Jedním z objektů, kam je předána získaná hodnota kmitočtu, je objekt osciloskopu s názvem *Osc jako gen*, který podle ní nastaví kmitočet interního generátoru. S hodnotou tohoto kmitočtu pak počítá též rovnice pro výpočet časové základny osciloskopu

$$TB = \frac{3 \cdot 1/f}{12}, \quad (15)$$

kde f je získaná hodnota kmitočtu testovacího signálu. Výsledná hodnota je v objektu *Cas* použita v příkazu „TIM:SCAL“ pro nastavení časové základny. Toto nastavení zajišťuje přesnost měření, jelikož zajišťuje zobrazení vždy stejného množství period měřeného signálu. Po nastavení časové základny a interního generátoru osciloskopu následuje blok *Delay*. Zpoždění dalších kroků předchází situaci, kdy by došlo k měření ještě před nastavením správné časové základny, což by ovlivnilo výsledné změřené hodnoty. Po uplynutí zpoždění dojde k samotnému měření, jehož příkazy se odesílají z objektu *Osc jako merici zarizeni*. Osciloskop nejprve vždy zapne požadované měření příkazem „MEAS:VRMS CHANn“ (kde n je číslo kanálu) pro měření efektivní hodnoty napětí

na jednom a druhém kanálu či příkazem „MEAS:PHAS CHAN1, CHAN2“ pro měření fáze mezi těmito kanály. Následně hodnoty změří (použitím téhož příkazu pouze s doplněním otazníku za název měřené veličiny, např. „MEAS:VRMS? CHAN1“) a uloží do proměnných U_z , U_g a $Phase$. Hodnoty těchto proměnných jsou zpracovávány dalšími bloky programu.

Napětí na generátoru U_g je nejprve objektem $V\ to\ mV$ děleno tisícem, aby bylo lépe uživatelsky čitelné, a zobrazí se v objektu $U_g\ [mV]$. Napětí na výstupu zesilovače se zobrazí v objektu $U_z\ [V]$ a rozdíl fází v objektu $Fáze\ [^\circ]$. Tyto objekty zobrazující aktuální měřené hodnoty veličin jsou součástí operačního rozhraní (Obrázek 14). Uživatel zde může též vidět aktuální kmitočet testovacího signálu v objektu $Frekvence\ [Hz]$. Z hodnot napětí na zesilovači U_z a napětí na generátoru U_g je v bloku $20\cdot\log$ získána hodnota modulu přenosu pomocí rovnice

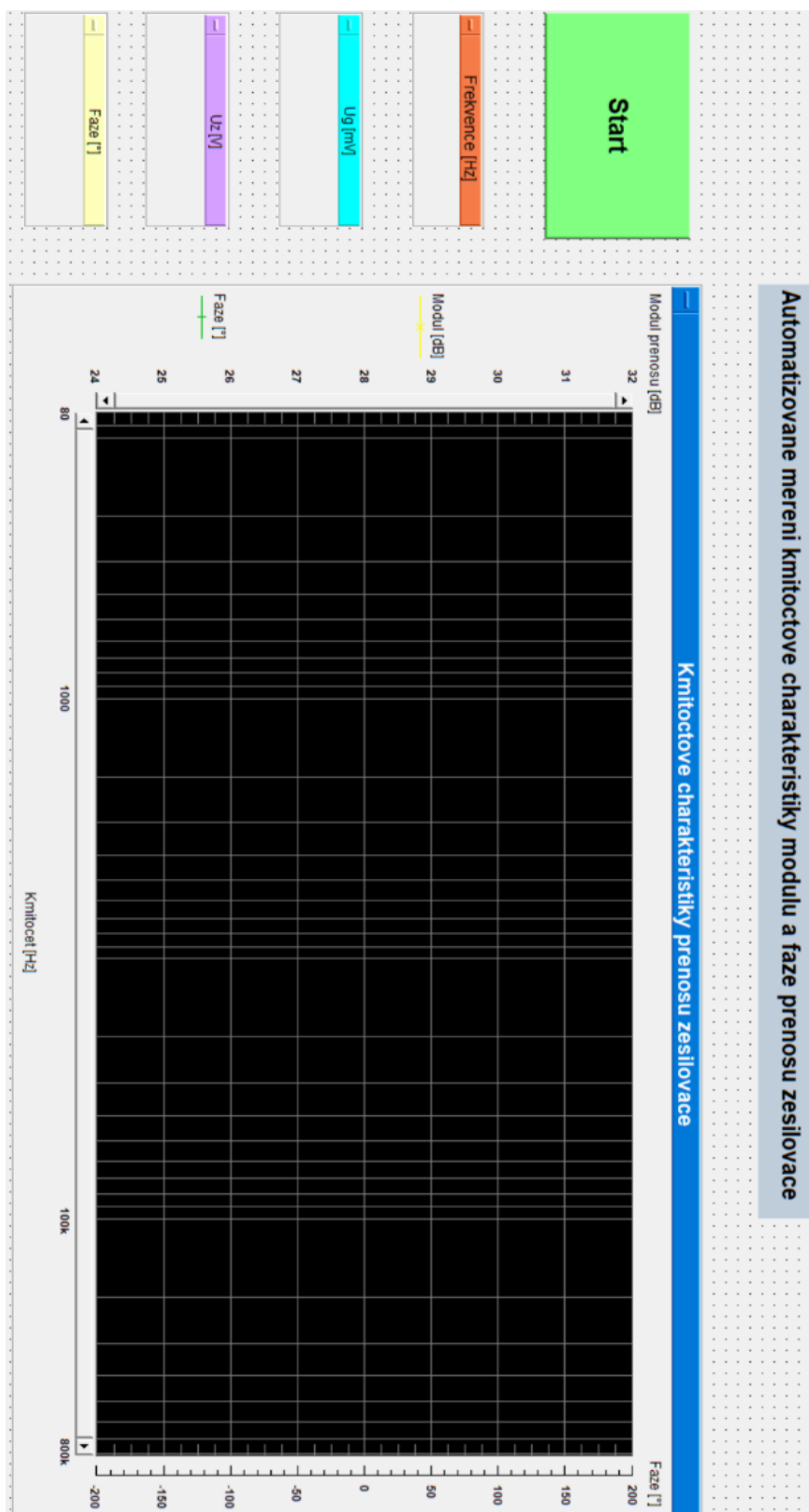
$$20 \cdot \log \frac{U_z}{U_g} . \quad (16)$$

Vypočítaná hodnota modulu přenosu a změřená fáze se dále předávají do objektu grafu, který v reálném čase vykresluje křivky závislosti modulu a fáze přenosu na kmitočtu. Tento graf se též zobrazuje v uživatelském rozhraní. Do proměnné X se ukládá kmitočet získaný ze zdrojového souboru, do proměnné Y modul přenosu zesilovače a do proměnné $Y1$ změřená fáze. Kmitočet je v grafu logaritmicky zobrazen na ose x , hodnoty modulu jsou vyneseny lineárně na hlavní ose y , fáze pak též lineárně na vedlejší ose y_1 .

Nakonec jsou získané hodnoty odeslány do druhého objektu $TO/FROM\ DDE$, který zajišťuje zápis změřených hodnot do zdrojového souboru. Zapisují se hodnoty napětí na generátoru U_g , napětí na zesilovači U_z a fáze $Phase$ mezi nimi, a též vypočtená hodnota modulu M z objektu $20\cdot\log$.

Po změření zkoumaných veličin na všech kmitočtech se zobrazí dialogové okno, které hlásí ukončení měření. Po jeho potvrzení se pošle do osciloskopu příkaz k vypnutí interního generátoru („WGEN:OUTP 0“).

Výsledný soubor v MS Excel *charakteristika.xlsx* obsahuje tabulku s hodnotami měřených kmitočtů a jim odpovídajícími napětími na generátoru a zesilovači, fází mezi těmito napětími a modul přenosu zesilovače. Taktéž zde dojde k vytvoření grafu, který si studenti vytisknou a v němž vyznačí přenosové pásmo zesilovače včetně mezních kmitočtů.



Obrázek 14: Uživatelské rozhraní programu pro automatizované měření kmitočtových charakteristik.

4. ZÁVĚR

Cílem této práce je realizovat pracoviště laboratorní úlohy pro ověření vlastností mikrofonního zesilovače Behringer Ultragain ProMic 2200 (Obrázek 15). Pro vytvoření teoretického podkladu pro úlohu byla v teoretické části práce věnována pozornost normám [1][2], z nichž byly čerpány postupy pro jednotlivá měření. V laboratorní úloze budou studenti měřit pět různých základních parametrů zesilovače: kmitočtové charakteristiky přenosu zesilovače, jeho harmonické zkreslení, poměr signál-šum, mezikanálové přeslechy a rychlost přeběhu. Pro měření kmitočtových charakteristik byl připraven automatizovaný systém na platformě HP VEE. Laboratorní úloha byla na základě vytvořeného návodu změřena a výsledky byly použity pro vytvoření vzorového protokolu. Byl též připraven návod ke kontrolnímu měření. Návod k laboratorní úloze, vzorový protokol, návod ke kontrolnímu měření a vzor kontrolního měření pro učitele jsou součástí příloh této práce.



Obrázek 15: Pracoviště laboratorní úlohy

Literatura

- [1] AES17-2015. *AES standard method for digital audio engineering: Measurement of digital audio equipment*. Revision of AES17-1998. New York: Audio Engineering Society, 2015.
- [2] ČSN EN 60268-3 ed. 2 (368305) *A Elektroakustická zařízení. Část 3, Zesilovače* = Sound system equipment. Part 3, Amplifiers. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [3] METZLER, B. *Audio Measurement Handbook*. Audio Precision, Inc., 1993.
- [4] *ULTRAGAIN PRO MIC2200 user manual*. Trident Chambers, Wickhams Cay, Road Town, Tortola, British Virgin Islands: MUSIC Group IP, 2013.
- [5] WIRSUM, S. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [6] GEOFF, M. 997 Hz?. *Earfluff and eyecandy: a very irregularly-updated blog on random topics* [online]. 3.3.2017 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.tonmeister.ca/wordpress/2017/03/03/997-hz/>
- [7] *Keysight Technologies* [online]. Washington DC: Keysight Technologies, 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/en/pd-1476554-pn-W4000D/vee-pro-932?cc=CZ&lc=eng>
- [8] SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Second edition. New York: Focal Press, Taylor & Franics Group, 2015. ISBN 9780415709743.
- [9] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7.
- [10] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-049-0.

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky

BPC-MVAA	...	předmět Měření v audiotechnice
FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
LSB	...	nejméně významný bit (Least Significant Bit)
SNR	...	odstup signál-šum (Signal to Noise Ratio)
SR	...	rychlost přeběhu (Slew Rate)
TB	...	časová základna (Time Base)
THD+N	...	celkové harmonické zkreslení se šumem
THD	...	celkové harmonické zkreslení
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně

Symbols

d_{mk}	...	modulační zkreslení k -té harmonické	[%]
d_{tot}	...	celkové harmonické zkreslení	[%]
f	...	kmitočet	[Hz]
f_1	...	kmitočet prvního budicího signálu	[Hz]
f_2	...	kmitočet druhého budicího signálu	[Hz]
f_k	...	kmitočet k -té harmonické	[Hz]
f_{max}	...	nejvyšší kmitočet vstupního signálu	[Hz]
f_{mez}	...	horní mezní kmitočet	[Hz]
f_{vz}	...	vzorkovací kmitočet	[Hz]
K	...	činitel harmonického zkreslení	[%]
L	...	úroveň signálu	[dB]
L_{out}	...	výstupní úroveň	[dB]
L_{outid}	...	ideální výstupní úroveň	[dB]
L_{outref}	...	referenční výstupní úroveň	[dB]
L_p	...	úroveň přeslechů	[dB]
L_{test}	...	referenční testovací úroveň	[dB]
$L_{testref}$	...	referenční testovací úroveň	[dB]
U	...	elektrické napětí	[V]

U_{vst}	...	vstupní napětí	[V]
$U_{\text{výst}}$	...	výstupní napětí	[V]
$U'_{\text{výst}}$	...	měřené výstupní napětí	[V]
U_{max}	...	nejvyšší hodnota napětí na výstupu zařízení	[V]
U_{hn}	...	napětí n -té harmonické složky	[V]
$U_{\text{výst}f_2-f_1}$	...	napětí harmonické složky na kmitočtu $f_2 - f_1$	[V]
$U_{\text{výst}f_2+f_1}$	...	napětí harmonické složky na kmitočtu $f_2 + f_1$	[V]
$U_{\text{výst}f_2-2f_1}$	...	napětí harmonické složky na kmitočtu $f_2 - 2f_1$	[V]
$U_{\text{výst}f_2+2f_1}$	...	napětí harmonické složky na kmitočtu $f_2 + 2f_1$	[V]
$U_{\text{výstref}}$	...	referenční napětí	[V]
τ	...	časový rozdíl	[ms]
$\Delta\varphi$	...	rozdíl fází	[°]

Seznam příloh

Příloha 1 - Elektronická příloha

Příloha 2 - Návod k laboratorní úloze

Příloha 3 - Vzorový protokol

Příloha 4 - Kontrolní měření – návod

Příloha 5 - Kontrolní měření – vzor

Příloha 1 - Elektronická příloha

Součástí elektronické přílohy je protokol z měření zesilovače přístrojem Audio Precision APx525. Takto zjištěné hodnoty jsou užity jako zdroje referenčních hodnot parametrů ověřovaných v laboratorní úloze a též pro srovnání s hodnotami uvedenými výrobcem v manuálu k přístroji. Příložené CD obsahuje též elektronickou verzi práce a program v prostředí HP VEE pro vícečetná měření kmitočtových charakteristik zesilovače.

Příloha 2 - Návod k laboratorní úloze

J5A Automatizované měření vlastností audio zesilovače

Cíl úlohy

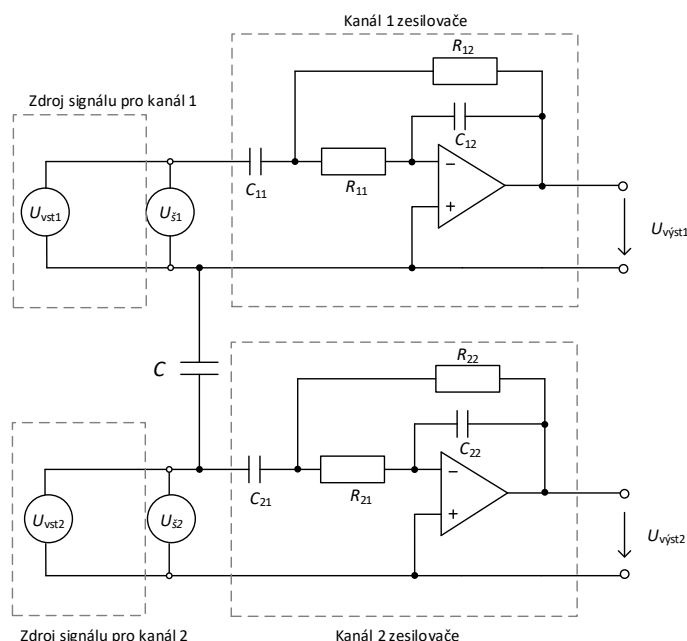
- Seznámit se s měřením kmitočtových charakteristik audio zesilovače využitím automatizace.
- Naučit se změřit důležité parametry audiozařízení, např. mezikanálové přeslechy, rychlost přeběhu zesilovače, jeho dynamický rozsah a harmonické zkreslení.

1 Úkol

- Pomocí programu v prostředí Keysight VEE změřte kmitočtovou charakteristiku modulu a fáze přenosu zesilovače.
- Pomocí osciloskopu změřte spektrum výstupního signálu ze zesilovače buzeného harmonickým signálem a vypočítejte hodnotu činitele harmonického zkreslení.
- Změřte úroveň přeslechů v zesilovači z kanálu 1 do kanálu 2.
- Změřte a vypočítejte úroveň odstupu signálu od šumu a rychlost přeběhu.

2 Teoretický úvod

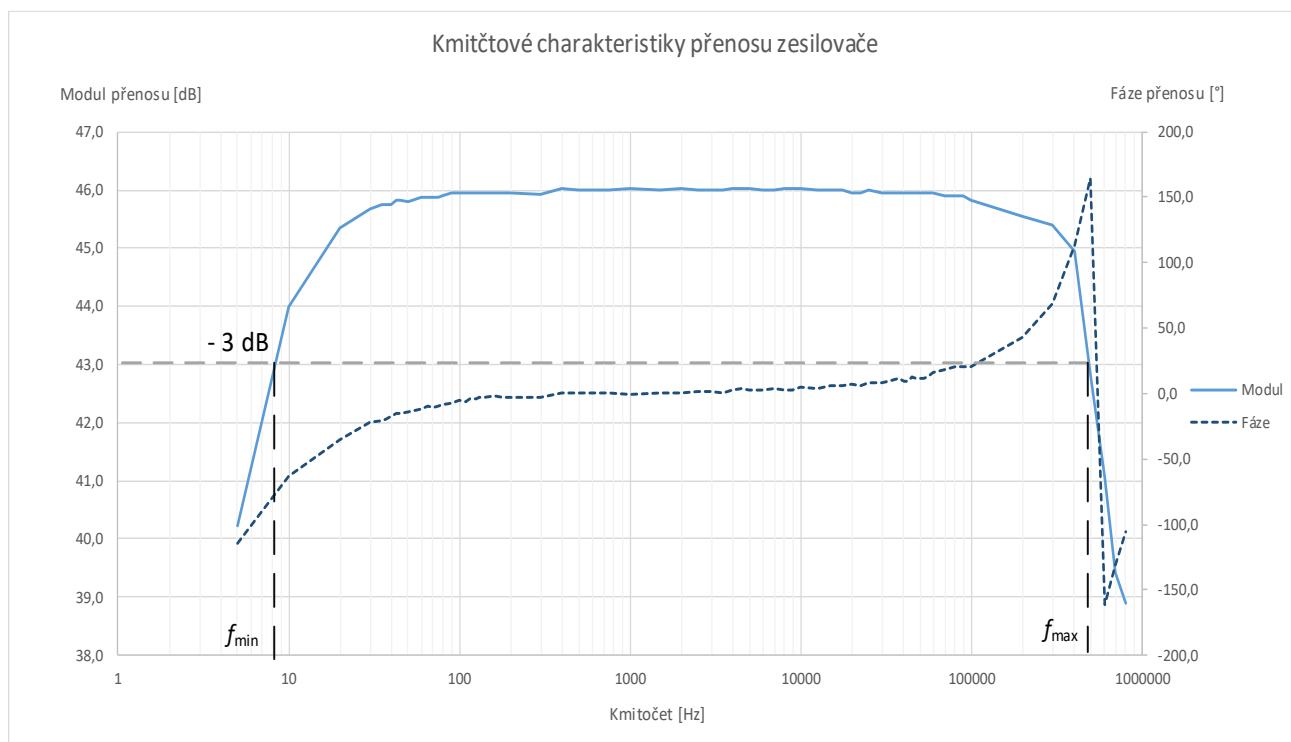
Pro studenty audio inženýrství je klíčové poznat a pochopit základní vlastnosti přístrojů, s nimiž se budou ve své praxi setkávat. Zesilovače jsou jednou ze základních součástí audio řetězce, nacházejí se na jeho začátku i na konci. Zesilují jak signál vysílaný elektroakustickými měniči před jeho dalším zpracováním, tak signál zpracovaný, aby bylo možné dostatečným výkonem napájet reproduktory. V reálných přístrojích dochází vlivem nelinearity zesilovače ke zkreslení, které nelze zcela potlačit. Pro zjednodušení je možno si dva kanály zesilovače představit jako dvě pásmové propusti (Obr. 1). U_{vst1} a U_{vst2} představují zdroj signálu, U_{s1} a U_{s2} jsou zdroje šumu, které omezují dynamický rozsah zesilovače. C znázorňuje kapacitní vazbu mezi oběma kanály zesilovače, která má za následek vznik přeslechů. C_{11} , C_{12} , R_{11} a R_{12} (a taktéž C_{21} , C_{22} , R_{21} a R_{22}) tvoří ve zpětné vazbě operačního zesilovače pásmovou propust.



Obr. 1 Náhradní zapojení zesilovače

Kmitočtová charakteristika přenosu zesilovače

Vzhledem k použití audio zesilovače je důležité, aby byl signál přenesen co nejvěrněji, pokud možno v celém slyšitelném pásmu (20 Hz až 20 kHz). Tuto vlastnost zesilovače popisuje jeho přenosová kmitočtová charakteristika, která udává závislost modulu napětového zesílení na kmitočtu a fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem. Ideální tvar kmitočtové charakteristiky přenosu je konstantní v celém kmitočtovém pásmu. Příklad kmitočtové charakteristiky modulu a fáze přenosu je na Obr. 2. Přenosové pásmo zesilovače určíme rozdílem kmitočtů f_{\min} a f_{\max} , při kterých poklesne modul přenosu o 3 dB (což odpovídá polovičnímu výkonu zesilovače) oproti zesílení v pracovní oblasti. Měření kmitočtové charakteristiky definuje norma AES [1]. Testovací signál má být o 20 dB nižší než maximální úroveň vstupního signálu (tento údaj uvádí výrobce v manuálu k přístroji. Pro mikrofonní vstup, který měříme, je maximální vstupní úroveň +10 dBu, tedy cca 2,45 V). Testovaný kmitočtový rozsah je definován od 20 Hz do horního mezního kmitočtu daného zařízením (výrobce uvádí v dokumentaci zesilovače 200 kHz), krok mezi kmitočty nemá přesáhnout jednu oktávu (tedy dvojnásobky kmitočtů).

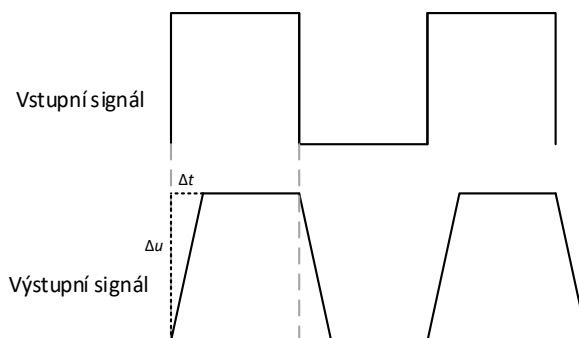


Obr. 2 Příklad kmitočtové charakteristiky modulu a fáze přenosu

Rychlost přeběhu

Rychlost přeběhu (*slew rate*) zesilovače určuje, jak rychle výstup zesilovače dokáže sledovat skokovou změnu vstupního signálu. Jedná se o dynamickou vlastnost zesilovače, která má vliv na zpracování prudkých změn v audio signálu. Měření se provádí při buzení obdélníkovým signálem. Rychlost přeběhu se vypočítá jako změna napětí za jednotku času:

$$SR = \frac{\Delta u}{\Delta t}. \quad (\text{V}/\mu\text{s}) \quad (1)$$

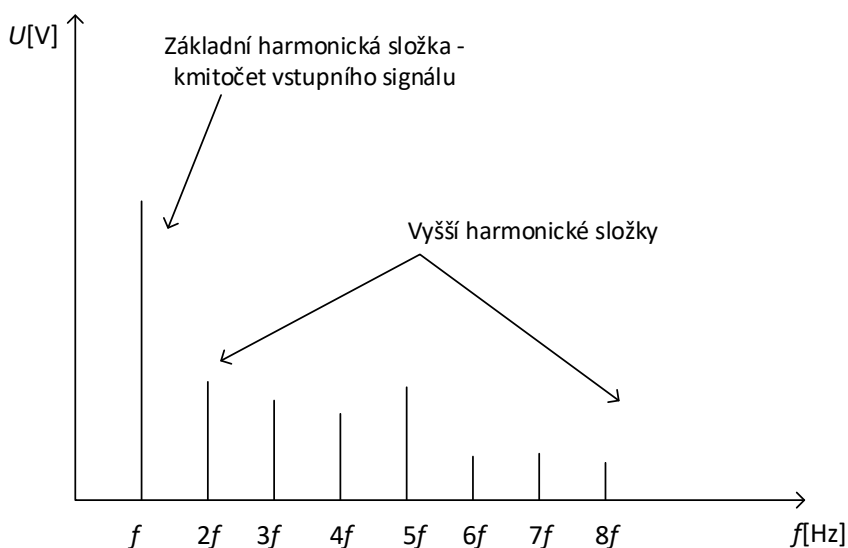


Obr. 3 Rychlost přeběhu zesilovače

Celkové harmonické zkreslení

Pro věrné přenesení zvuku je důležitá linearita použitého zesilovače, tedy odchylka skutečné závislosti výstupního signálu na vstupním oproti lineární závislosti. Vyšší nelinearita zesilovače vede k tvorbě nežádoucích vyšších harmonických složek ve výstupním signálu. Tyto vyšší harmonické složky se nacházejí na celočíselných násobcích kmitočtu f vstupního harmonického signálu. Vyšší harmonické složky

výstupního signálu lze určit Fourierovou transformací signálu, což umožňuje běžný osciloskop či spektrální analyzátor (Obr. 4).



Obr. 4: Příklad kmitočtové analýzy signálu pomocí Fourierovy transformace

Celkové harmonické zkreslení udává, kolik procent ze zkresleného signálu tvoří součet vyšších harmonických složek. Pro činitel harmonického zkreslení pak platí

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\%, \quad (\%) \quad (2)$$

kde U_1 je amplituda základního signálu a U_2 až U_n jsou amplitudy vyšších harmonických složek. Měření je opět definováno normou AES [1]. Testovací signál je o 1 dB nižší, než je maximální vstupní úroveň signálu, kmitočet vstupního harmonického signálu je 997 Hz. Na osciloskopu měříme maximální úrovně jednotlivých harmonických L_n v dBV. 0 dBV odpovídá 1 V. Přepočet z dBV na V se provádí pomocí rovnice

$$L_{dBV} = 20 \cdot \log \frac{U}{1} \quad (\text{dBV}) \quad (5)$$

Mezikanálové přeslechy

U vícekanálových zařízení se projevují mezikanálové přeslechy. K nim dochází kapacitní vazbou mezi signálovými cestami a narůstají s rozdílem úrovní mezi signály v jednotlivých kanálech, s rostoucím kmitočtem signálu a též s klesající vzájemnou vzdáleností vodičů. Přeslechy se samozřejmě projevují na kvalitě zesíleného výstupního signálu a jsou nežádoucím jevem, který lze kvantifikovat. Na výstupu kanálu 1 zesilovače pak měříme napětí $U_{výst1}$, tedy zesílený vstupní signál kanálu 1, a zároveň na výstupu kanálu 2 měříme parazitní napětí $U_{výst2}$. Úroveň přeslechů určíme vztahem

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{U_{výst2}}{U_{výst1}} \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

Při měření přeslechů budíme jeden z kanálů signálem o úrovni o 20 dB nižší, než je jeho maximální vstupní úroveň, druhý kanál je zkratován. Měření by mělo proběhnout na kmitočtech od 20 Hz do horního mezního kmitočtu daného zařízení.

Dynamický rozsah

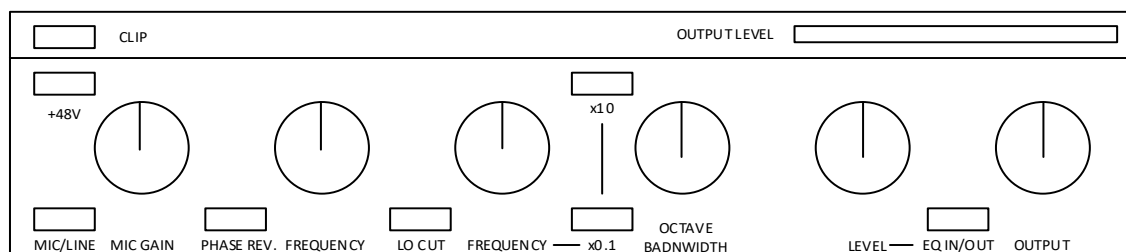
Dynamickým rozsahem se rozumí rozdíl největší a nejmenší úrovně signálu, které lze zařízením zpracovat při zaručení jeho kvality dané výrobcem. Dynamický rozsah je zdola omezen šumem přístroje a shora jeho napájecím napětím. SNR (*Signal to Noise Ratio*) určuje poměr signálu a šumu v dB, čímž definuje dynamický rozsah přístroje:

$$SNR = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{výstmax}}}{U_{\text{výstmin}}} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

Obvyklý dynamický rozsah symfonického orchestru může být až 100 dB, CD nosiče poskytují rozsah 96 dB, magnetický záznam přibližně 60 dB a rozhlasové vysílání cca 40 dB. K měření dynamického rozsahu budíme přístroj nejprve signálem o maximální vstupní úrovni, a poté vstup zařízení zkratujeme. Přesným voltmetrem měříme výstupní napětí jak při buzení kanálu signálem ($U_{\text{výstmax}}$), tak při zkratovaném vstupu ($U_{\text{výstmin}}$).

3 Postup měření

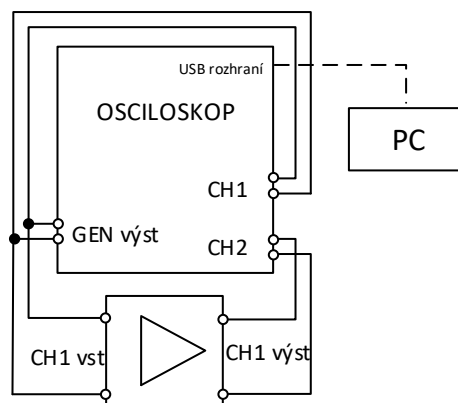
Analyzovaným přístrojem je mikrofonní předzesilovač Behringer Ultragain ProMic2200. Toto zařízení umožňuje nastavení mnoha parametrů – vstupního zisk (MIC GAIN), mezní kmitočet dolní propusti (FREQUENCY_LO CUT) a ekvalizéru, respektive pásmové propusti/zádrže (FREQUENCY, OCTAVE BANDWIDTH, LEVEL), a úroveň výstupního signálu (OUTPUT). Zesilovač též obsahuje přepínač vstupní impedance buď pro mikrofonní nebo pro linkový vstup (MIC/LINE), tlačítko pro zapnutí fázového invertoru (PHASE REV.), možnost aktivace integrované dolní propusti (LO CUT) a ekvalizéru (EQ IN/OUT). Před započítím nechte všechny tyto přepínače vypnuté (nesvítí žádné tlačítko), kromě přepínače MIC/LINE. Tím zapnete nastavení zesilovače pro mikrofonní vstup. Hodnotu vstupního zisku nastavte nejprve na minimum, budete ji upravovat před každým měřením tak, aby byl ukazatel výstupní úrovně (OUTPUT LEVEL) na 0 dB. V rámci domácí přípravy si prostudujte uživatelský manuál [2].



Obr. 5 Ovládací panel měřeného zesilovače

Měření kmitočtové charakteristiky modulu a fáze přenosu

Výrobce ověřovaného zesilovače Behringer Ultragain ProMic 2200 uvádí pracovní oblast v rozsahu 10 Hz až 200 kHz. K ověření bude použito automatizované měření v prostředí pro virtuální instrumentaci HP VEE.



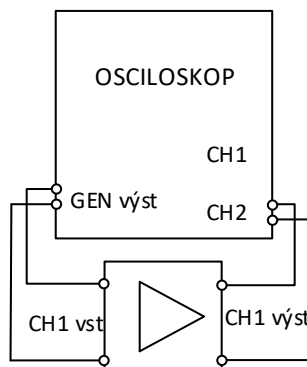
Obr. 6 Schéma zapojení pro měření kmitočtových charakteristik

- 1) Zapojte přístroje podle schématu (Obr. 6). Zapněte počítač a otevřete soubor *zesilovac_charakteristika.vee*. Měření kmitočtových charakteristik proběhne automaticky v prostředí Keysight VEE.
- 2) Spusťte měření tlačítkem **Start**. Nejprve se zobrazí dialogové okno s popisem správného nastavení přístroje. Přístroj je v tuto chvíli buzen vnitřním generátorem osciloskopu. Nastavte přístroj podle pokynů v dialogovém okně – zapněte zesilovač pro mikrofonní vstup tlačítkem MIC/LINE a nastavte vstupní zisk tak, aby ukazatel přístroje indikoval 0 dB. Po provedení požadovaných úprav stiskněte tlačítko **OK**, čímž se spustí samotné měření. Kmitočtové charakteristiky se zobrazí v objektu grafu a změřené hodnoty se vyexportují do souboru *charakteristika.xlsx*.
- 3) Ze souboru *charakteristika.xlsx* si vytiskněte graf a vyznačte v něm přenosové pásmo zesilovače.
- 4) Program ukončete.

Měření rychlosti přeběhu

- 1) Přístroje ponechte zapojeny stejně jako v předchozím měření. Na interním generátoru osciloskopu nastavte obdélkový signál se střídou 50 %, amplitudou 5 V_{PP} a kmitočtem 20 kHz. **Nastavte vstupní zisk zesilovače na 0 dB** a poté zapněte generátor.
- 2) Pomocí kurzorů na osciloskopu odečtete změnu času Δt a napětí Δu u náběžné i sestupné hrany signálu a запиšte je do tabulky.

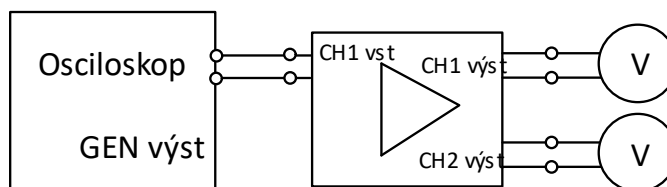
Měření harmonického zkreslení



Obr. 7 Schéma zapojení pro měření harmonického zkreslení

- 1) Přístroje zapojte podle schématu na Obr. 7. Na generátoru nastavte harmonický signál s amplitudou $4,6 V_{pp}$ a kmitočtem 997 Hz. Na zesilovači nastavte vstupní zisk (GAIN) na minimum.
- 2) Na osciloskopu zobrazte kmitočtové spektrum signálu.
- 3) Nastavte zobrazení tak, aby bylo dobře viditelných prvních deset harmonických složek signálu (pomocí enkodérů *Horizontal* a *Vertical*) a запиšte si úrovně jejich amplitud v dBV do Tabulky 1.

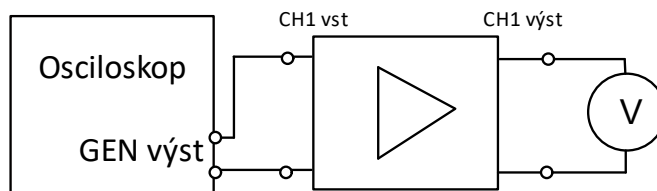
Měření mezikanálových přeslechů



Obr. 8 Schéma zapojení pro měření mezikanálových přeslechů

- 1) Zapojte přístroje dle schématu. Na generátoru zvolte harmonický signál s amplitudou $730 mV_{pp}$ a kmitočet 997 Hz. Nastavte na obou kanálech stejný zisk tak, aby ukazatel na kanálu 1 při buzení indikoval 0 dB a tutéž hodnotu zisku nastavte i na kanálu 2.
- 2) Změřte výstupní napětí na kanálu 1 $U_{výst1}$. Nyní změřte voltmetrem, který k zesilovači připojíte pomocí přípravku, výstupní napětí druhého kanálu zesilovače $U_{výst2}$. Obě hodnoty si запиšte do tabulky.
- 3) Opakujte toto měření pro kmitočty 1 994 Hz, 4 985 Hz, 9 970 Hz, 14 955 Hz a 19 940 Hz.

Měření dynamického rozsahu



Obr. 9 Schéma zapojení pro měření dynamického rozsahu

- 1) Zapojte přístroje podle schématu na Obr. 9. Na generátoru nastavte harmonický signál s amplitudou $5 V_{pp}$ a kmitočet 997 Hz. Na zesilovači nastavte vstupní zisk (GAIN) na minimum.
- 2) Voltmetrem změřte výstupní napětí kanálu 1 na zesilovači $U_{výstmax}$ a tuto hodnotu si запиšte.
- 3) Vypněte generátor osciloskopu tlačítkem WAVE GEN, odpojte vstup zesilovače od generátoru a na BNC konektor připojte zkratovací terminál. Nyní запиšte změřenou hodnotu výstupního napětí na zesilovači $U_{výstmin}$.
- 4) Pomocí vzorce vypočítejte dynamický rozsah přístroje.

4 Zpracování naměřených hodnot

A. V grafech vytvořených z hodnot získaných automatizovaným měřením vyznačte kmitočty, na nichž došlo k poklesu zesílení o 3 dB, a přenosové pásmo.

- B. Vypočítejte rychlost přeběhu zesilovače pomocí vzorce (1).
- C. Pomocí vzorce (2) vypočítejte činitel harmonického zkreslení z amplitud prvních deseti vyšších harmonických složek. Graf, který jste si uložili z osciloskopu, vytiskněte a přiložte k protokolu. Vyznačte v něm prvních deset harmonických složek signálu.
- D. Vypočítejte úroveň přeslechů z kanálu 1 do kanálu 2 pomocí vzorce (3) pro všechny kmitočty.
- E. Vypočítejte poměr signál/šum přístroje pomocí vzorce (4).

Tabulka 1: Měření harmonického zkreslení

n	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f	Hz	997	1 994	2 991	3 988	4 985	5 982	6 979	7 976	8 973	9 970
L_n	dBV										
U_n	V										

Tabulka 2: Měření přeslechů, dynamického rozsahu a rychlosti přeběhu

Přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2			
f	$U_{\text{výst1}}$	$U_{\text{výst2}}$	L_p
Hz	V	mV	dB
997			
1 994			
4 985			
9 970			
14 955			
19 940			
Dynamický rozsah			
$U_{\text{výstmax}}$	$U_{\text{výstmin}}$	SNR	
V	mV	dB	
Rychlost přeběhu			
Hrana	Δu	Δt	SR
	V	μs	V/ μs
Náběžná			
Sestupná			

Závěr

Na základě vašich měření diskutujte parametry zesilovače udávané výrobcem v dokumentaci přístroje.

Kontrolní otázky

1. Co popisuje veličina THD?
2. Jak vznikají v přístroji přeslechy?

Zdroje

- [1] AES17-2015. *AES standard method for digital audio engineering: Measurement of digital audio equipment*. Revision of AES17-1998. New York: Audio Engineering Society, 2015.
- [2] *ULTRAGAIN PRO MIC2200 user manual*. Trident Chambers, Wickhams Cay, Road Town, Tortola, British Virgin Islands: MUSIC Group IP, 2013.

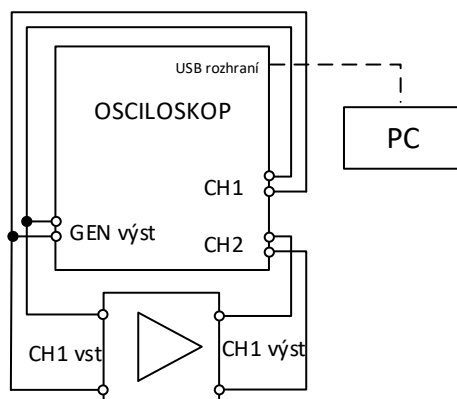
Příloha 3 - Vzorový protokol

Zadání

- Seznámení se s měřením kmitočtových charakteristik přenosu audio zesilovače využitím automatizace.
- Změření důležitých parametrů audiozařízení (mezikanálové přeslechy, rychlost přeběhu zesilovače, jeho dynamický rozsah a harmonické zkreslení).

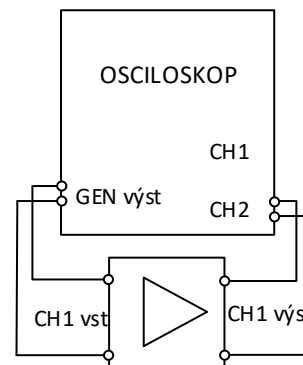
Schémata zapojení, vztahy

Měření kmitočtových charakteristik přenosu zesilovače a rychlosti přeběhu:



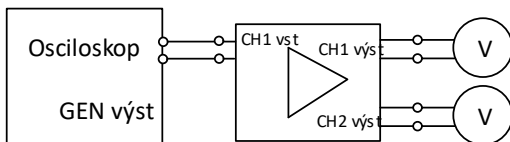
Rychlost přeběhu: $SR = \frac{\Delta u}{\Delta t}$

Měření harmonického zkreslení:

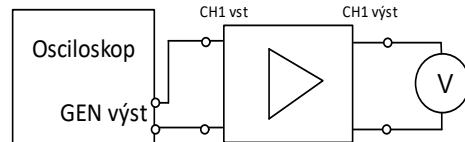


Činitel harmonického zkreslení: $THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\%$

Měření mezikanálových přeslechů:



Měření dynamického rozsahu:



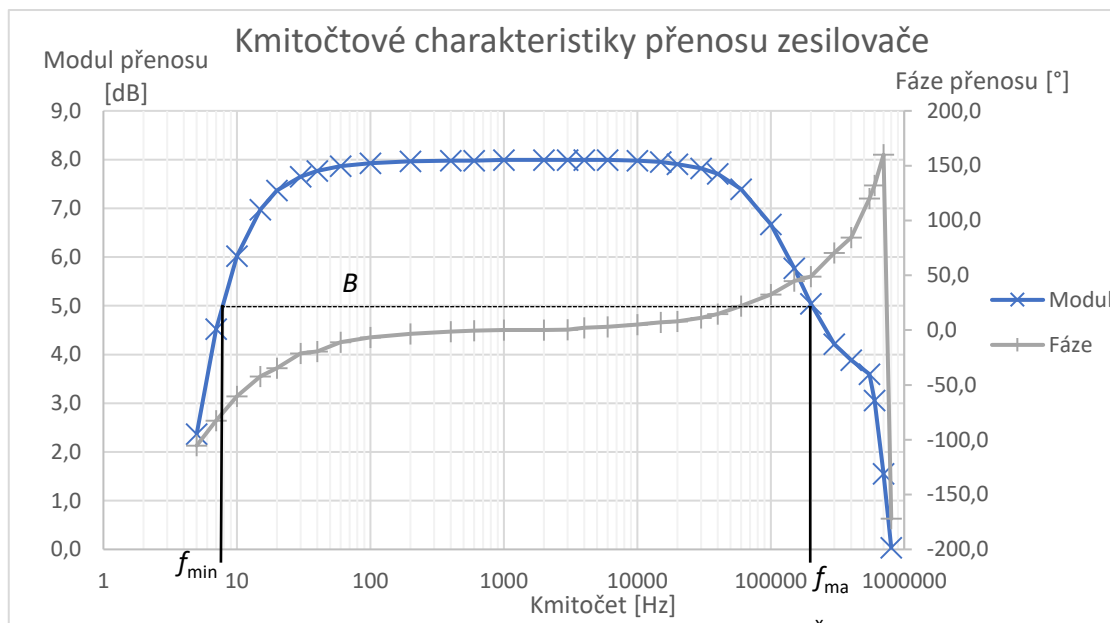
Úroveň mezikanálových přeslechů: $L_p = 20 \cdot \log \frac{U_{výst2}}{U_{výst1}}$

Signal-to-noise ratio: $SNR = 20 \cdot \log \frac{U_{výstmax}}{U_{výstmin}}$

Výsledky měření

n	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f	Hz	997	1 994	2 991	3 988	4 985	5 982	6 979	7 976	8 973	9 970
L_n	dBV	9,5	-40,5	-53,0	-61,0	-49,5	-54,5	-49,0	-59,5	-54,0	-60,0
U_n	mV	2985,4	9,4	2,2	0,9	3,3	1,9	3,5	1,1	1,9	1,0

Přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2			
f	$U_{výst1}$	$U_{výst2}$	L_p
Hz	V	mV	dB
997	0,65	0,32	-66,10
1 994	0,65	0,45	-63,14
4 985	0,65	0,92	-56,94
9 970	0,65	1,62	-52,01
14 955	0,64	2,23	-49,21
19 940	0,64	2,81	-47,13
Dynamický rozsah			
$U_{výstmax}$	$U_{výstmin}$	SNR	
V	mV	dB	
2,64	0,16	84,35	
Rychlost přeběhu			
Hrana	Δu	Δt	SR
	V	μs	V/ μs
náběžná	8,20	6,06	1,35
sestupná	8,20	5,78	1,42



Příklady výpočtů

$$L_n = 20 \cdot \log U_n = 20 \cdot \log 9,5 = 2\,985,4 \text{ mV}$$

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{9,4^2 + 2,2^2 + \dots + 1,0^2}}{\sqrt{2985,4^2 + 9,4^2 + 2,2^2 + \dots + 1,0^2}} \cdot 100\% = 0,38 \%$$

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{výst}2}}{U_{\text{výst}1}} = 20 \cdot \log \frac{0,32}{640} = -66 \text{ dB}$$

$$SNR = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{výstmax}}}{U_{\text{výstmin}}} = 20 \cdot \log \frac{2640}{0,16} = 84,35 \text{ dB}$$

$$SR = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{8,2}{6,06} = 1,35 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Seznam použitých přístrojů

Osciloskop Agilent DSO-X 2002A
Měřený zesilovač Behringer Ultragain ProMic 2200
Přípravky pro připojení měřicích přístrojů
Multimetr Agilent 34410A

Závěr

Měřením jsme získali kmitočtovou charakteristiku modulu a fáze přenosu. Zjistili jsme, že výsledky odpovídají údajům z manuálu k přístroji, kde je uvedeno, že pro rozsah 20 Hz–20 kHz je maximální změna modulu přenosu ± 3 dB. Dle námi změřených údajů je pokles o 3 dB na kmitočtech $f_{\min} = 8$ Hz a $f_{\max} = 200$ kHz. Změřené harmonické zkreslení je 0,38 %, což je ve srovnání s manuálem velmi odlišná hodnota. Rozdíl v měření je způsoben rozdílným nastavením vstupního signálu. Norma určuje, že se má měřit při úrovni vstupního signálu o 1 dB menší, než je maximální vstupní úroveň, zatímco výrobce dle manuálu měřil při +4 dBu, což je o 6 dB méně, než je uvedená maximální vstupní úroveň (+10 dBu). Přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2 se při narůstajícím kmitočtu zvětšují (rozdíl je cca 20 dB). V manuálu je uvedena hodnota -88 dB, při měření byly zjištěny hodnoty vyšší. To může být opět způsobeno rozdílným nastavením vstupního zisku přístroje, jelikož hladina šumu stoupá při zvětšení zisku. Dynamický rozsah přístroje byl zjištěn 84,35 dB, rychlost přeběhu pro nástupnou hranu

1,35 V/ μ s a pro sestupnou 1,42 V/ μ s. Tyto hodnoty výrobce v manuálu k přístroji neuvádí.

Kontrolní otázky


1. Co popisuje veličina THD?

THD popisuje, kolik procent užitečného signálu tvoří směs vyšších harmonických složek, které vznikly po zpracování signálu přístrojem.

2. Jak vznikají v přístroji přeslechy?

Přeslechy vznikají kapacitní vazbou mezi souběžnými vodiči, narůstají s kmitočtem a délkou souběžně vedených vodičů.

Příloha 4 - Kontrolní měření – návod

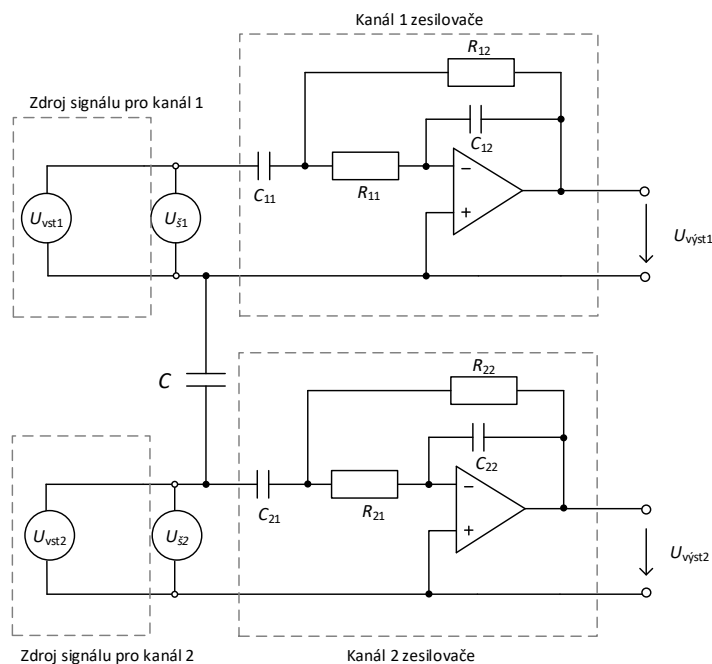
		Předmět Měření v audiotechnice	
		Jméno	
		Ročník	Studijní skupina
		Spolupracoval	Měřeno dne
Kontroloval	Hodnocení	____/10	Dne
Číslo úlohy 5A	Název úlohy Měření vlastností audio zařízení		

Zadání

- U mikrofonního předzesilovače Behringer Ultragain ProMic2200 změřte následující charakteristiky:
 - Rychlost přeběhu
 - Mezikanálové přeslechy
 - Dynamický rozsah

Teoretický úvod

Zesilovače jsou jednou ze základních součástí audio řetězce, nacházejí se na jeho začátku i na konci. Pro zjednodušení je možno si dva kanály zesilovače představit jako dvě pásmové propusti (obr. 1). U_{vst1} a U_{vst2} představují zdroj signálu, U_{s1} a U_{s2} jsou zdroje šumu, které omezují dynamický rozsah zesilovače. C znázorňuje kapacitní vazbu mezi oběma kanály zesilovače, která má za následek vznik přeslechů. C_{11} , C_{12} , R_{11} a R_{12} (a taktéž C_{21} , C_{22} , R_{21} a R_{22}) tvoří ve zpětné vazbě operačního zesilovače pásmovou propust.



Obr. 1: Náhradní zapojení zesilovače

Postup měření

Před samotným měřením se ujistěte, že je vypnutý ekvalizér, Lo Cut filtr, otočení fáze i fantomové napájení. Zesilovač nastavte pro mikrofonní vstup.

- 1) Změřte rychlost přeběhu SR zesilovače pro vstupní obdélníkový signál o kmitočtu 20 kHz, se střídou 1:1 a napětím 5 V_{pp}. Vstupní zisk zesilovače nastavte na 0 dB.
- 2) Změřte přeslechy L_p z kanálu 1 do kanálu 2 zesilovače při kmitočtech 997 Hz, 9 970 Hz a 19 940 Hz pro harmonický signál o napětí 730 mV_{pp}. Oba kanály nastavte shodně dle kanálu 1, kde nastavíte vstupní zisk tak, aby při buzení indikoval ukazatel 0 dB.
- 3) Změřte dynamický rozsah SNR mikrofonního předzesilovače na kmitočtu 997 Hz při vstupním napětí 5 V_{pp}. Vstupní zisk zesilovače nastavte opět na minimum.
- 4) Na přiložené kmitočtové charakteristice zesilovače (graf 1) vyznačte přenosové pásmo zesilovače B a mezní kmitočty f_{min} a f_{max} . Odečtené hodnoty přibližně vyčíslete a запиšte do tabulky.

Výsledky měření

Tab. 1: Vlastnosti mikrofonního předzesilovače

Přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2:			
f	$U_{\text{výst1}}$	$U_{\text{výst2}}$	L_p
Hz	V	mV	dB
997			
9 970			
19 940			
Dynamický rozsah:			
$U_{\text{výstmax}}$	$U_{\text{výstmin}}$	SNR	
V	mV	dB	
Rychlost přeběhu:			
Hrana	Δu	Δt	SR
	V	μs	V/ μs
Náběžná			
Sestupná			

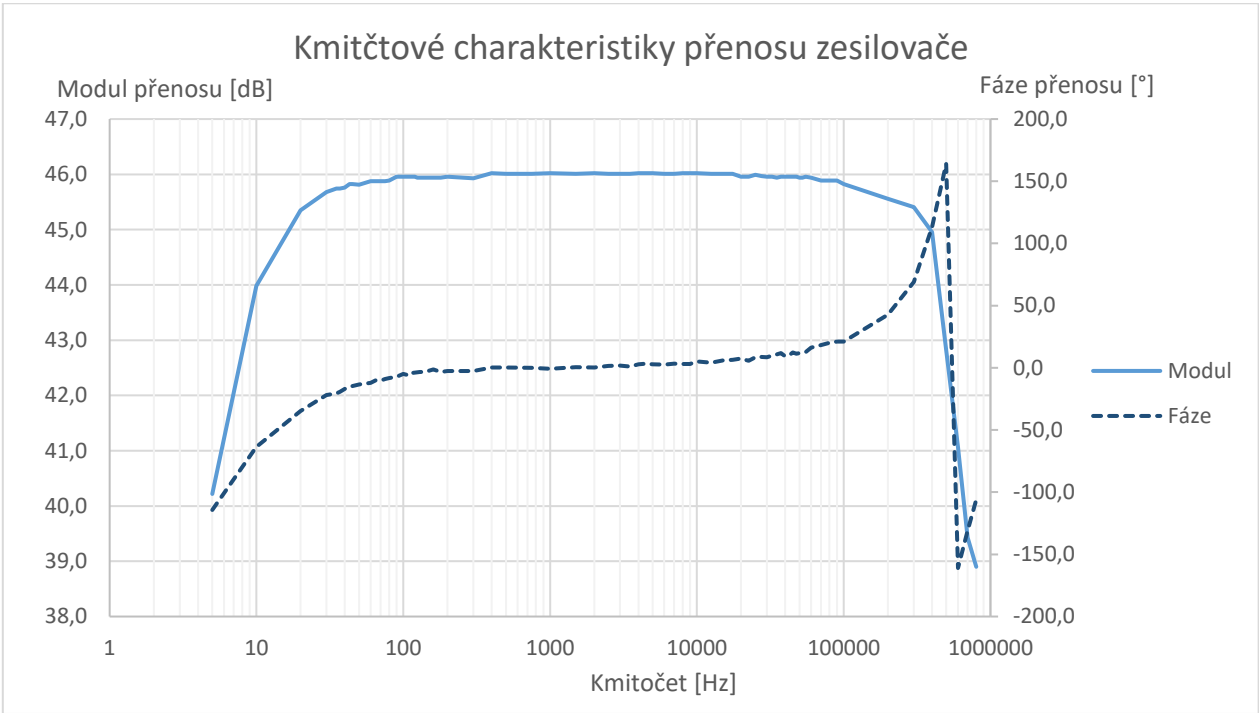
Příklady výpočtů

$L_p =$

$SNR =$

$SR =$

Graf 1: Kmitočtová charakteristika modulu a fáze přenosu zesilovače



Seznam použitých přístrojů

- Osciloskop Agilent DSO-X 2002AA
- Voltmetr Agilent 34410A
- 2x přípravek pro zapojení měřicích přístrojů
- Zkratovací terminál


Závěr

Kontrolní otázky

Co je dynamický rozsah přístroje?

Co popisuje rychlost přeběhu?

Příloha 5 - Kontrolní měření – vzor

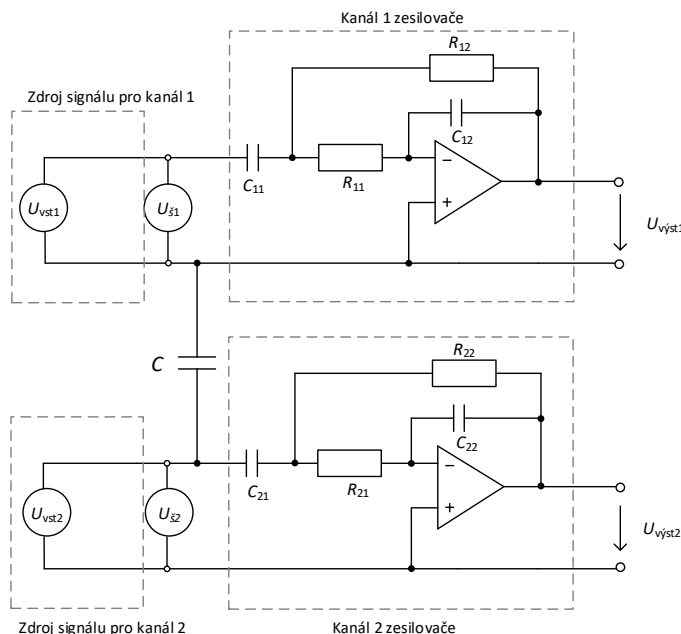
		Předmět Měření v audiotechnice	
		Jméno	
		Ročník	Studijní skupina
		Spolupracoval	Měřeno dne
Kontroloval		Hodnocení	____/10
Dne			
Číslo úlohy	Název úlohy		
5A	Měření vlastností audio zařízení		

Zadání

- U mikrofonního předzesilovače Behringer Ultragain ProMic2200 změřte následující charakteristiky:
 - Rychlost přeběhu
 - Mezikanálové přeslechy
 - Dynamický rozsah

Teoretický úvod

Zesilovače jsou jednou ze základních součástí audio řetězce, nacházejí se na jeho začátku i na konci. Pro zjednodušení je možno si dva kanály zesilovače představit jako dvě pásmové propusti (obr. 1). U_{vst1} a U_{vst2} představují zdroj signálu, U_{s1} a U_{s2} jsou zdroje šumu, které omezují dynamický rozsah zesilovače. C znázorňuje kapacitní vazbu mezi oběma kanály zesilovače, která má za následek vznik přeslechů. C_{11} , C_{12} , R_{11} a R_{12} (a taktéž C_{21} , C_{22} , R_{21} a R_{22}) tvoří ve zpětné vazbě operačního zesilovače pásmovou propust.



Obr. 1: Náhradní zapojení zesilovače

Postup měření

Před samotným měřením se ujistěte, že je vypnutý ekvalizér, Lo Cut filtr, otočení fáze i fantomové napájení. Zesilovač nastavte pro mikrofonní vstup.

- 1) Změřte rychlost přeběhu SR zesilovače pro vstupní obdélníkový signál o kmitočtu 20 kHz, se střídou 1:1 a napětím 5 V_{pp}. Vstupní zisk zesilovače nastavte na 0 dB.
- 2) Změřte přeslechy L_p z kanálu 1 do kanálu 2 zesilovače při kmitočtech 997 Hz, 9 970 Hz, 19 940 Hz pro harmonický signál o napětí 730 mV_{pp}. Oba kanály nastavte shodně dle kanálu 1, kde nastavíte vstupní zisk tak, aby při buzení indikoval ukazatel 0 dB.
- 3) Změřte dynamický rozsah SNR mikrofonního předzesilovače na kmitočtu 997 Hz při vstupním napětí 5 V_{pp}. Vstupní zisk zesilovače nastavte opět na minimum.
- 4) Na přiložené kmitočtové charakteristice zesilovače (graf 1) vyznačte přenosové pásmo zesilovače B a mezní kmitočty f_{\min} a f_{\max} . Odečtené hodnoty přibližně vyčíslete a запиšte do tabulky.

Výsledky měření

Tab. 1: Vlastnosti mikrofonního předzesilovače

Přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2			
f	$U_{\text{výst1}}$	$U_{\text{výst2}}$	L_p
Hz	V	mV	dB
997	0,65	0,32	-66,10
9 970	0,65	1,62	-52,01
19 940	0,64	2,81	-47,13
Dynamický rozsah			
$U_{\text{výstmax}}$	$U_{\text{výstmin}}$	SNR	
V	mV	dB	
2,64	0,16	84,35	
Rychlost přeběhu			
Hrana	Δu	Δt	SR
	V	μs	$\text{V}/\mu\text{s}$
náběžná	8,20	6,06	1,35
sestupná	8,20	5,78	1,42

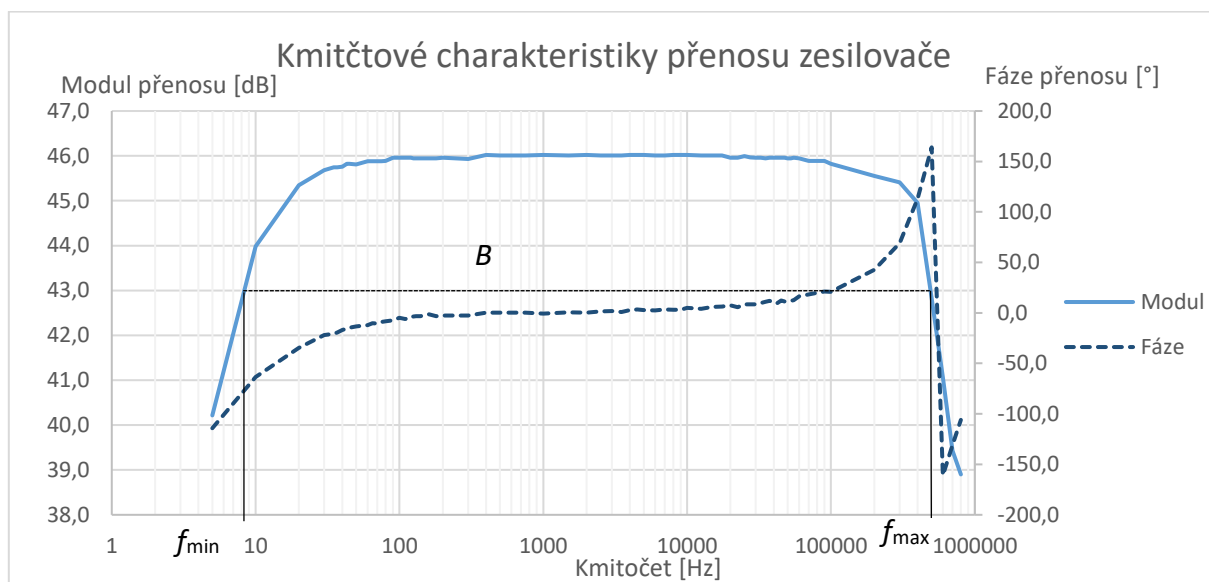
Příklady výpočtů

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{výst}2}}{U_{\text{výst}1}} = 20 \cdot \log \frac{0,32}{640} = -66 \text{ dB}$$

$$SNR = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{výstmax}}}{U_{\text{výstmin}}} = 20 \cdot \log \frac{2640}{0,16} = 84,3 \text{ dB}$$

$$SR = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{8,2}{6,06} = 1,35 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Graf 1: Kmitočtová charakteristika modulu a fáze přenosu zesilovače



Seznam použitých přístrojů

- Osciloskop Agilent DSO-X 2002AA
- Voltmetr Agilent 34410A
- 2x přípravek pro zapojení měřicích přístrojů
- Zkratovací terminál

Závěr

Měřením bylo zjištěno, že přeslechy z kanálu 1 do kanálu 2 jsou při 997 Hz -66 dB a rostou s rostoucím kmitočtem vstupního signálu. Dynamický rozsah přístroje byl změřen 84,35 dB. Rychlost přeběhu pro náběžnou hranu je 1,35 V/ μ s, pro sestupnou pak 1,42 V/ μ s. V přiložené kmitočtové charakteristice je přenosové pásmo od f_{\min} 8 Hz do f_{\max} 500 kHz.

Kontrolní otázky

Co je dynamický rozsah přístroje?

Dynamický rozsah je rozdíl nejvyšší a nejnižší hodnoty vstupního signálu, kterou je přístroj schopen zpracovat. Zdola je omezen šumem a shora limitací přístroje.

Co popisuje rychlost přeběhu?

Rychlost přeběhu popisuje schopnost zesilovače přizpůsobit se skokovým změnám v úrovni vstupního napětí.